

ANÁLISIS DE ANTECEDENTE DE RECUBRIMIENTOS EN BASE DLC  
PARA SER APLICADO EN UN COJINETE DE BANCADA

ÁLVARO ENRIQUE LOPEZ ZORRO  
PEDRO NICOLÁS AYURE RODRIGUEZ

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES  
INGENIERÍA Y CIENCIAS BÁSICAS  
INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ D.C  
2021

ANÁLISIS DE ANTECEDENTE DE RECUBRIMIENTOS EN BASE DLC  
PARA SER APLICADO EN UN COJINETE DE BANCADA

ÁLVARO ENRIQUE LOPEZ ZORRO  
PEDRO NICOLÁS AYURE RODRIGUEZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO  
MECÁNICO

JESÚS MANUEL GUTIERREZ BERNAL  
INGENIERO QUÍMICO  
MAGÍSTER EN INGENIERÍA: MATERIALES Y PROCESOS

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES  
INGENIERÍA Y CIENCIAS BÁSICAS  
INGENIERÍA MECÁNICA  
BOGOTÁ D.C  
2021

Nota de Aceptación

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Ciudad y Fecha (día, mes, año) (Fecha de entrega)

Dedicatoria

Este trabajo de grado esta dedicado principalmente a Dios por bendecirnos y guiarnos en este proceso de alcanzar este logro tan anhelado.

## AGRADECIMIENTOS

A mis padres Alberto y Clara por su amor, por su sacrificio y su entrega en todos estos años, gracias a ellos he logrado llegar a donde estoy y ser la persona que soy, son los mejores padres. A mis hermanas Kattering y Jenniffer, mi sobrina Sofía y mi tío Ramiro por brindarme siempre su apoyo incondicional en este proceso y cada uno de los miembros de mi familia por estar presente acompañándome y brindándome apoyo moral a lo largo de esta etapa de mi vida. A cada una de las personas que me apoyaron y ayudaron a que este trabajo de grado se realizara con éxito, en especial a aquellos que me guiaron y brindaron sus conocimientos. A mi compañero de Tesis y amigo Nicolás Ayure porque sin él no hubiese podido lograr este propósito tan importante.

Agradezco a Dios por la salud y la vida, por guiarme y acompañarme a lo largo de mi vida, ser mi apoyo en los momentos difíciles. A mis padres Alberto y Clara por ser mi motor de vida y mayor inspiración, que a través de su amor, paciencia y buenos valores, me ayudaron a cumplir con este objetivo. Agradezco a mi director de Tesis Jesús Manuel Gutiérrez por brindarme sus conocimientos y guiarme en este proyecto. Agradezco a todos los docentes que me formaron y acompañaron a lo largo de mi carrera universitaria. Agradezco a la fundación Universitaria Los Libertadores, por haberme brindado las oportunidades y ayudarme a crecer personal y profesionalmente

Le agradezco a Dios por haberme dado la oportunidad de vivir y tener metas la cual está es una de esas , a mi Madre Gladys Rodriguez por el amor y su grande sacrificio en este proceso de educarme y sacarme adelante es ella mi motor de vida y mi fuente de inspiración para alcanzar mis metas y tener sueños , a mi hermano Weiman por apoyarme y ayudarme cada vez que lo necesitaba , A mi compañero de este proyecto y amigo Álvaro Lopez porqué cada día que pasaba me acompañaba en este proceso , Gracias a mi profesor y director de Tesis Jesús Manuel Gutiérrez por enseñarme ,ayudarme y guiarme en este proyecto de grado , a la fundación universitaria los libertadores por abrirme sus puertas para cumplir este sueño .

## CONTENIDO

	Pág.
1. RESUMEN.....	10
2. INTRODUCCIÓN.....	11
3. OBJETIVOS .....	12
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	12
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
4.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	13
4.2 JUSTIFICACIÓN .....	14
5. TEORÍA DEL ARTE.....	15
6. PARTES DE UN COJINETE DE BANCADA .....	22
6.1 TIPOS DE COJINETES.....	23
6.2 APLICACIONES EN LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA .....	23
7. METODOLOGÍA.....	24
8. DESARROLLO DEL PROYECTO .....	26
8.1 ETAPA 1.....	26
8.2 ETAPA 2.....	34
8.3 ETAPA 3.....	42
8.4 ETAPA 4.....	71
9. CONCLUSIONES.....	76
10. RECOMENDACIONES .....	77
11. BIBLIOGRAFÍA .....	78
12. CIBERGRAFÍA.....	81

## GLOSARIO

DLC “Diamond Like Carbon” (Diamante símil al carbono)

PVD “Physical Vapor Desposition” (Deposición física de vapor)

CVD “Chemical Vapor Deposition” (Deposición química de vapor)

EB-PVD “Electron-beam physical vapor deposition” (Deposición física de vapor por haz de electrones).

(MWCVD) “Microwave assisted Chemical Vapor Deposition” (Deposición de vapor químico asistido por microondas)

EIS “Electrochemical impedance spectroscopy” (Espectroscopia de impedancia electroquímica)

(PECVD) “Plasma-enhanced chemical vapor deposition” (Deposición de vapor químico mejorada con plasma)

IBAD “Ion beam assisted deposition” (Deposición asistida mediante haces de iones)

(RFCVD) “Radio frequency assisted Chemical Vapor Deposition” (Deposición de vapor químico asistido por radiofrecuencia)

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Revestimiento de Babbit- TECNOFRIC	36
Tabla 2. Usos habituales de los revestimientos Babbit-TECNOFRIC	37
Tabla 3. Aleación y composición química según la norma <b>ASTM B23</b> - TENOFRIC	37
Tabla 4. Propiedades mecánicas de los materiales del Cigüeñal- zwick-roell	40
Tabla 5. Rango de Vacío-Tecnovac	66
Tabla 6. Unidades en las que se mide el vacío-Tecnovac	66
Tabla 7. Propiedades Mecánicas de los recubrimientos	73

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1. Partes de un cojinete de bancada	22
FIGURA 2. SmarArt de Proyecto	25
FIGURA 3. Lugares de trabajo de un cojinete	26
FIGURA 4. Diseño de Babbit trimetalico	32
FIGURA 5. Evaporación de calentamiento mediante resistencias	43
FIGURA 6. Evaporación de calentamiento mediante haz de electrones	44
FIGURA 7. Sputtering Magnetron	46
FIGURA 8. IBAD	48
FIGURA 9. Técnica de pared Caliente	51
FIGURA 10. MWCVD	54
FIGURA 11. EIS	64
FIGURA 12. Ejemplo toma de datos a una frecuencia específica	65
FIGURA 13. Bomba Membrana	67
FIGURA 14. Bomba Rotativa	67
FIGURA 15. Bomba Difusora	68
FIGURA 16. Bomba Turbo Molecular	69
FIGURA 17. Rangos de Trabajo	70
FIGURA 18. Ternario de Recubrimientos DLC	72

## 1. RESUMEN

En la revisión de antecedentes el recubrimiento DLC es una de las mejores técnicas en cuanto a mejorar propiedades mecánicas ya que presenta altos valores de dureza los cual desemboca en mejora en procesos cíclicos , es decir, elementos que están sometidos a fatiga esto también ayuda en la resistencia al desgaste también tienen un muy bajo coeficiente de fricción lo cual es muy bueno para el ambiente de trabajo al que se somete un cojinete de bancada al realizar pretratamientos se mejoran aún más las propiedades del sustrato esta técnica de recubrimiento tiene varias técnicas de deposición principalmente se desarrolla bajo las técnicas de PVD y CVD las cuales tienen distintos métodos de activación y ciertas demanda de trabajo de vacío a nivel mundial se han obtenido varias ramificaciones y variantes debido a su amplio campo de acción así mismo lo desarrollan para distintas demandas lo cual hace que la técnica sea más innovadora al paso del tiempo ya que mejora en gran magnitud distintas propiedades mecánicas

## 2. INTRODUCCIÓN

Mediante el análisis de antecedentes de recubrimientos en base DLC se aborda uno de los principales inconvenientes en el análisis de fallas en las partes utilizadas en los motores de combustión interna; para este caso de estudio un motor diésel; el problema es originado por las fallas que se presentan continuamente en los casquetes de bancada, elementos en los cuales se encuentran fisuras y fracturas durante el funcionamiento del motor, teniendo como consecuencia daños graves en las partes que interactúan con los casquetes en el proceso del motor de combustión interna (cigüeñal y biela).

El análisis de antecedentes sobre la corrosión explica cómo evitar que los casquetes de bancada presenten fisuras y fracturas, de esta manera buscar una técnica de ensayo no destructivo que advierta por medio de inspección cuando los elementos están próximos a fallar y evitar el daño de las demás partes del motor de combustión interna.

La técnica DLC es una manera efectiva de realizar un mantenimiento predictivo, además es muy útil en este tipo de problemas de corrosión ya que proporciona propiedades incomparables: como la baja fricción, alta dureza y resistencia a la corrosión, con esta técnica se pueden mejorar las propiedades mecánicas para evitar la corrosión en los casquetes de bancada del motor de combustión interna

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un análisis de antecedentes de los fenómenos corrosivos de algunos materiales recubiertos por el método de DLC.

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar viabilidad de recubrimientos en base DLC.
- Interpretar y entender los procedimientos de un recubrimiento en base DLC
- Analizar la influencia del proceso de recubrimiento sobre las propiedades de corrosión

## 4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 4.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Los cojinetes de bancada experimentan diferentes tipos de daños debido a la corrosión en el motor de combustión interna, a continuación, mencionaremos las causas de los daños:

#### • CAUSAS DE LA CORROSIÓN POR FRICCIÓN

1. El apriete de los tornillos no es suficiente y se genera fricción
2. En el cárter de aluminio, la caja y el cojinete se pueden deformar debido a un aumento potencial en la temperatura, de tal manera el asiento fijo del cojinete ya no es apto
3. Vibraciones en el cárter que generan pequeños movimientos
4. Vibraciones en el cigüeñal que generan pequeños movimientos
5. Tensión previa defectuosa debido a un orificio muy grande o a un cojinete muy pequeño
6. Cuando el cigüeñal se tiende a doblar, deja un efecto especial sobre la superficie de deslizamiento

#### • CAUSAS DE LA CORROSIÓN QUÍMICA:

1. Aditivos o aceites no permitidos y agresivos para el motor
2. Contaminación de mezcla de aceite con agua y también productos anticongelantes
3. Desgaste, erosión y cavitación pueden aumentar la velocidad de corrosión, debido a que penetran la superficie y se genera la activación química
4. Las elevadas temperaturas de trabajo en el motor aceleran los procesos químicos
5. Productos agresivos como el azufre y el sulfuro de hidrógeno
6. Debido al envejecimiento del aceite se generan ácidos y sales metálicas favoreciendo la corrosión

## 4.2 JUSTIFICACIÓN

Esta investigación tiene por objetivo analizar las fallas debido a la corrosión y la velocidad a la que se presenta este fenómeno, por medio de la técnica de recubrimiento DLC. La importancia de esta investigación recae en que se exploran y estudian antecedentes de recubrimientos en base DLC para así ver comprobar la viabilidad de implementarlo en un cojinete de bancada. Esto con la finalidad de mejorar las propiedades relacionadas con la corrosión de los cojinetes de bancada, así evitar las dificultades y fallas que se presentan en el momento de fabricar y diseñar este componente tan importante en el funcionamiento del motor.

## 5. TEORÍA DEL ARTE

### ***Cojinetes de bancada en aceros inoxidable 304***

Los cojinetes del motor, o casquillos, son los puntos de apoyo de ejes que los sostienen y guían en su rotación reduciendo el rozamiento. Estos casquillos pueden ir colocados directamente en el eje o pieza del mismo, pero en los motores suelen ir montados en soportes específicos con el fin de facilitar su montaje y evitar que se muevan con el funcionamiento del motor. Están compuestos de la siguiente manera: **BIMETÁLICOS**: usan mezclas de capas de aluminio sobrepuestas sobre acero. Los cojinetes con esta formulación son usados en una gama extensa de motores. Son recomendados para utilizarlos en motores con carga de trabajo mediana, ofreciendo larga duración. Se identifican por las letras (RA ó A) **BIMETÁLICOS SUPERIOR**: Las aleaciones de capas de aluminio incluyen silicón, lo que les permite soportar mayores cargas, ofrecer mayor resistencia al desgaste y evitar las fracturas en la superficie de fricción. Estos cojinetes pueden ser instalados en motores de uso normal, pero son especialmente recomendados para motores que trabajan bajo condiciones severas y de mayor esfuerzo. Se pueden identificar por las letras (AP ó P) **TRIMETÁLICOS**: son de aleaciones de tres metales, el cobre, el plomo y el acero. Son altamente resistentes a la fatiga, pero menos resistentes a los daños producidos por efectos de la corrosión. Estos cojinetes son usados en motores de trabajo pesado y se identifican mediante las letras (CP ó P) y para los motores de alto desempeño con las letras (CH). Para mejorar la duración de estas piezas, es importante una buena lubricación del motor, por eso la forma de los casquillos tiene ranuras para el engrase.

En general casi todo el cojinete de bancada está hecho de acero; con un 90% del grosor total del cojinete lo que le da resistencia estructural para calzar en su alojamiento, con una capa de aluminio equivalente aproximadamente al 10% del grosor total del cojinete, esta capa de aluminio provee absorción para las cargas cíclicas que soporta el cojinete. También conduce de manera eficiente el calor y lo transfiere de la superficie del cojinete al refuerzo de la capa de acero. El cojinete además posee una unión de cobre que tiene un grosor aproximado de unos diez milésimos de pulgada, provee buena adherencia entre capas y transfiere el calor con rapidez entre capas. En su estructura el cojinete también posee una capa de plomo y estaño con un grosor aproximado de un milésimo de pulgada (demasiado pequeño), esta capa brinda capacidad de lubricación, adaptabilidad y absorción. Para finalizar también posee un baño de estaño que lo protege contra la corrosión y mejora su apariencia

1. Comportamientos mecánicos y tribológicos de películas de Ti-DLC depositadas sobre acero inoxidable 304: Exploración con dopaje de Ti de micro a macro

Las películas de DLC fueron dopadas con titanio sobre un sustrato de acero inoxidable 304 mediante pulverización catódica con magnetrón no equilibrado mejorado asistida por haz de iones. Las láminas de acero inoxidable 304 pulidas se utilizaron como sustratos para la deposición de la película y se eligieron las siliconas pulidas P (100) con un tamaño de 5 mm x 30 mm x 0,3 mm para calcular con precisión la tensión residual de las películas. Todos los sustratos de acero inoxidable tuvieron que limpiarse con acetona durante 15 min y limpieza ultrasónica con alcohol durante 20 min para eliminar el aceite y las impurezas superficiales, respectivamente. Luego sopló los sustratos con nitrógeno seco antes de colocarlos en la cámara de pulverización catódica del magnetrón. Cuando se dopa una mínima cantidad de titanio en una película DLC, se libera la tensión residual y también se mejoran las propiedades de adhesión entre la película de DLC y el sustrato de acero inoxidable 304. Con un aumento de dopaje de titanio de 1,82% se obtiene la mayor adhesión que es de 35,8N, la tensión interna más baja de 1,31 GPa y la dureza más alta de 18,21 GPa. El haz de iones se utilizó para mejorar la eficiencia de la deposición y la adhesión de las películas sobre los sustratos de acero inoxidable<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Zhou, Y., Li, L., Shao, W., Chen, Z., Wang, S., Xing, X., & Yang, Q. (2020). Mechanical and tribological behaviors of Ti-DLC films deposited on 304 stainless steel: Exploration with Ti doping from micro to macro. *Diamond and Related Materials*, 107, 107870. doi:10.1016/j.diamond.2020.107870

## 2. Preparación y comportamientos tribológicos de la película compuesta DLC / espinela sobre acero inoxidable 304 formada por oxidación electrolítica de plasma catódico

La película a trabajar en este artículo está compuesta de carbono tipo diamante (DLC) / espinela (mineral que pertenece al grupo de los óxidos) sobre un sustrato de acero inoxidable 304, fue fabricado mediante oxidación electrolítica de plasma catódico (CPEO) en solución de glicerina, y se caracterizaron su microestructura, composición y componentes de fase. La película compuesta de DLC / espinela podría reducir el coeficiente de fricción y mejorar la resistencia al desgaste del acero inoxidable 304, especialmente a temperatura ambiente. En el último tiempo para fabricar las películas de acero inoxidable 304 y aceros con alto contenido de carbono se recomienda utilizar el método oxidación electrolítica de plasma catódico (CPEO) debido a la buena resistencia al desgaste a temperatura ambiente, aunque preocupa realizar este estudio a altas temperaturas. La micro dureza máxima en la película de DLC / espinela es de hasta 900 HV (8,826GPa), y su micro dureza en la película de la capa exterior es de aproximadamente 800 HV (7,846GPa), que es mucho más alta que la del sustrato de acero inoxidable 304. El coeficiente de fricción del sustrato de acero inoxidable 304 está entre 0,4 y 0,7. El coeficiente de fricción de la película compuesta está entre 0,18 y 0,4 y varía mucho menos que el del sustrato tanto a temperatura ambiente como a alta temperatura. El mecanismo de desgaste del sustrato de acero inoxidable 304 incluye desgaste abrasivo, desgaste adhesivo, desgaste por oxidación y desgaste por fatiga a temperatura ambiente y altas temperaturas, mientras que el mecanismo de desgaste de la película DLC / espinela es principalmente desgaste adhesivo junto con una pequeña deformación plástica y fatiga de bajo-alta temperatura<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Jin, X., Zhang, Y., Chen, L., Yu, J., & Xue, W. (2018). Preparation and tribological behaviors of DLC/spinel composite film on 304 stainless steel formed by cathodic plasma electrolytic oxidation. *Surface and Coatings Technology*, 338, 38–44. doi:10.1016/j.surfcoat.2018.01.069

### 3. Fricción y desgaste de películas DLC sobre acero inoxidable austenítico 304 en soluciones corrosivas

Para este artículo las películas de DLC se depositaron sobre un sustrato de acero inoxidable austenítico 304 mediante el método CVD de plasma (reacción de una mezcla de gases en el interior de una cámara de vacío) utilizando radiofrecuencia (13,56MHz). Después de la caracterización de la película de la espectrometría Raman y la espectrometría de descarga luminiscente, se investigaron las propiedades de fricción y desgaste de las películas en soluciones de cloruro de sodio (NaCl) al 3% en masa, ácido clorhídrico normal (HCl) 0,05, ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) y ácido sulfúrico. (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Estas películas de DLC se sometieron a pruebas de fricción y desgaste utilizando un aparato de fricción de superficie de bola sobre una superficie plana en las soluciones ya mencionadas. En las pruebas realizadas dentro de la solución corrosiva, el coeficiente de fricción de las películas de DLC fue de 0,1 y el sustrato de acero inoxidable austenítico 304 fue de 0,5. Las películas de DLC depositadas sobre el sustrato acero inoxidable austenítico 304 mostraron un volumen de desgaste evidentemente menor que el sustrato solo. El proceso de revestimiento con DLC es eficaz para disminuir el coeficiente de fricción y mejorar la resistencia al desgaste por corrosión del 304 en soluciones ácidas y NaCl al 3% en masa. Se depositó una película de DLC sobre un sustrato 304 con una capa intermedia de Silicio utilizando el método CVD de plasma RF. La concentración de CH<sub>4</sub> en el gas de procesamiento (CH<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>) se varió del 20 al 100%. Todas las películas producidas en este estudio mostraron espectros Raman típicos de DLC. La banda G del espectro Raman de la película depositada al 20% de CH<sub>4</sub> se desplazó hacia una frecuencia más alta. Las durezas de la película aumentaron a medida que disminuyó el contenido de hidrógeno en las películas DLC. La película de DLC depositada al 100% de CH<sub>4</sub> sobre un sustrato 304 tenía bajos coeficientes de fricción y alta resistencia al desgaste en soluciones de ácido clorhídrico normal (HCl) 0,05, ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) y ácido sulfúrico. (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).<sup>3</sup>

<sup>3</sup>Yamauchi, N., Okamoto, A., Takahara, H., Demizu, K., Ueda, N., Sone, T., & Hirose, Y. (2003). Friction and wear of DLC films on 304 austenitic stainless steel in corrosive solutions. *Surface and Coatings Technology*, 174-175, 465–469. doi:10.1016/s0257-8972(03)00406-7

#### 4. Propiedades mecánicas del recubrimiento de DLC depositado sobre una superficie de acero inoxidable 304 nano cristalizado

Para este artículo la técnica utilizada es la nano cristalización de superficie (SNC), esta técnica mejora notablemente las propiedades mecánicas de la superficie de los materiales metálicos y además acelera la difusión térmica de los átomos elementales. En este estudio la nano cristalización superficial por SMAT se utiliza como un pre tratamiento para mejorar el sustrato de acero inoxidable 304 para el recubrimiento DLC depositado por pulverización catódica. Se estudia comparativamente la estructura de la interfaz, la dureza, la adherencia, el comportamiento de impacto y las propiedades tribológicas del recubrimiento DLC sobre los sustratos de acero inoxidable de grano grueso y nano cristalizado superficial. Los aceros inoxidables austeníticos se utilizan ampliamente en aplicaciones industriales, biomédicas y otras principalmente debido a su excelente resistencia a la corrosión. El revestimiento de carbono tipo diamante (DLC) que posee una mejor resistencia a la corrosión, mayor dureza y resistencia al desgaste se utiliza para modificar la superficie de los aceros austeníticos y otros aceros. Placas de acero inoxidable AISI 304 con un tamaño de  $20 \times 20 \times 5 \text{ mm}^3$  se esmerilan con papeles de SiC hasta un grano 1200, se pulieron con pasta de diamante de  $10 \mu\text{m}$  y se limpiaron ultrasónicamente en agua desionizada, acetona y luego etanol para su uso (indicado como muestras granuladas o CG). El tamaño de grano de las muestras CG estaba en el rango de 30 a  $50 \mu\text{m}$ . Las muestras de CG se sometieron a tratamiento SNC en una máquina SMAT ultrasónica utilizando bolas de acero inoxidable de  $\Phi 2 \text{ mm}$ . El tratamiento se detuvo durante 1 a 2 minutos después de cada 3 minutos de tratamiento. El tiempo total de tratamiento fue de 15 min. También se utilizó aire en circulación para enfriar la muestra durante el tratamiento. A continuación, las muestras se pulieron con cuidado para eliminar la capa superficial contaminada y se limpiaron con ultrasonidos (muestras SNC). Las pruebas mecánicas muestran que la muestra SNC-DLC tiene mayor dureza superficial, capacidad de carga, resistencia a la cohesión de la película y mejor resistencia al desgaste que la muestra CG-DLC.<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Fu, T., Zhou, Z. F., Zhou, Y. M., Zhu, X. D., Zeng, Q. F., Wang, C. P., ... Lu, J. (2012). Mechanical properties of DLC coating sputter deposited on surface nanocrystallized 304 stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 207, 555–564. doi:10.1016/j.surfcoat.2012.07.076

**Artículos científicos base de datos scielo relacionados con el acero inoxidable 304**

## 5. Resistencia al Desgaste y a la Corrosión de Recubrimientos de DLC depositados sobre aceros AISI 304 y AISI 1020

En este estudio se produjeron películas de DLC sobre dos sustratos, uno de acero inoxidable AISI 304 y el otro de acero al carbono AISI 1020. Este estudio fue realizado utilizando la técnica de descarga en plasma DC-pulsada bipolar PECVD usando hexano (C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>) como gas precursor. Una Inter capa de silicio amorfo fue depositada utilizando la misma técnica de deposición y gas silano (SiH<sub>4</sub>) con el objetivo de elevar la adherencia de las películas a los sustratos de aceros (AISI 304 y AISI 1020). Las películas de DLC fueron caracterizadas a través del estudio de sus propiedades mecánicas y tribológicas, así como del comportamiento de la resistencia a la corrosión en función de la tensión de auto polarización aplicada al sustrato durante el crecimiento. Los sustratos de acero AISI 304 y AISI 1020 fueron pulidos y limpiados ultrasónicamente en un baño de acetona antes de ser colocados en la cámara de deposición. La tensión total compresiva de las películas de DLC fue determinada utilizando la medida de la curvatura del sistema recubrimiento-sustrato de silicio antes y después de la deposición con un perfilómetro y aplicando la ecuación de Stoney. La reducción de la tensión total compresiva de las películas fue fundamental para el aumento de la adherencia sobre las superficies de los aceros utilizados. Los resultados obtenidos sugieren que la adherencia de las películas de DLC depende del material del sustrato, obteniendo una mayor adherencia en las películas depositadas sobre los sustratos de acero inoxidable AISI 304. Los resultados experimentales demostraron que la utilización de la Inter capa de silicio amorfo aumenta considerablemente la adherencia de las películas a los sustratos de acero.<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Capote, G. & capote mastrapa, Gil & Olaya, Jhon. (2015). RESISTENCIA AL DESGASTE Y A LA CORROSIÓN DE RECUBRIMIENTOS DE DLC DEPOSITADOS SOBRE ACEROS AISI 304 Y AISI 1020. *Rev. LatinAm. Metal. Mat.*, 35. 134-141.

6. Influencia de pulsos de alta frecuencia y energía moderada en la deposición de DLC sobre sustratos metálicos mediante la técnica de pulverización catódica con magnetrón.

Para este estudio se implantaron iones de carbono mediante la técnica de Magnetron Sputtering para la deposición de las películas DLC sobre diferentes superficies metálicas entre ellas acero inoxidable AISI 304. Para lograr esto, se aplicaron pulsos de alta frecuencia y energía moderada a los sustratos durante el crecimiento de la película. En el proceso, se forma una vaina de plasma durante el tiempo de activación de los pulsos, acelerando los iones hacia el sustrato, fue crucial una capa de silicio para evitar delaminación. El proceso de implantación de iones por inmersión en plasma combinado con la deposición de DLC mostró que era posible controlar el grosor y la tensión de la película de DLC en crecimiento, cambiando las condiciones de la implantación de iones y los parámetros del recubrimiento de DLC. Además, incluso cuando la tensión se mantuvo alta (más de 10 GPa), probablemente la fina capa de interfaz formada por el bombardeo de iones pudo anclar la gran tensión de compresión. Este es un tema importante porque abre posibilidades para el crecimiento de películas más gruesas sin delaminación .<sup>6</sup>

<sup>6</sup> Oliveira, R. M., Hoshida, L., Ueda, M., & Baba, K. (2009). Influence of high frequency and moderate energy pulses on DLC deposition onto metallic substrates by magnetron sputtering technique. *Brazilian Journal of Physics*, 39(2), 331–336. doi:10.1590/s0103-97332009000300017

## 6. PARTES DE UN COJINETE DE BANCADA

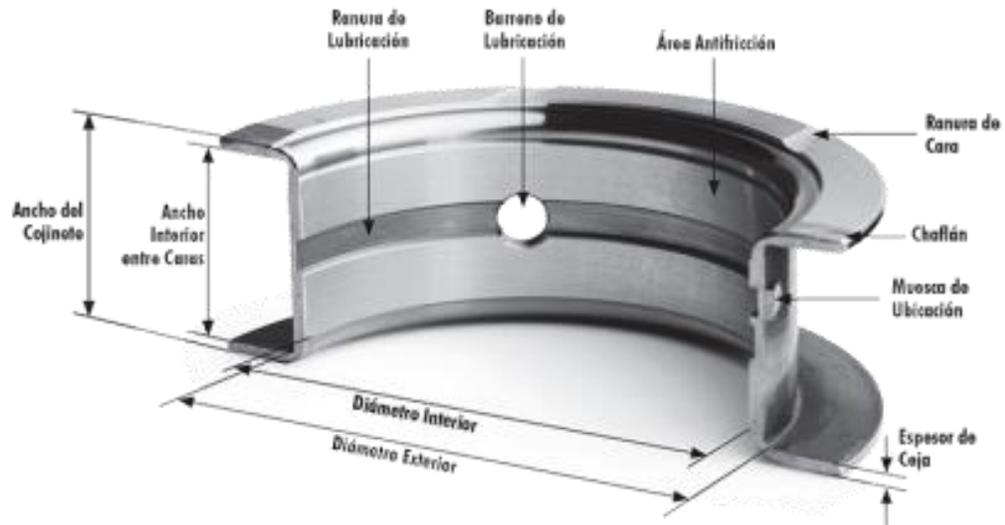


Figura 1 , Parte de un cojinete de bancada tomada de <https://dacomsa.com/dacomsastorefront/dacomsa/es/moresaHome/metales>

Estás partes se dividen en subgrupos así:

1. Plano de separación
2. Exposición de la superficie de deslizamiento
3. Espesor de pared
4. Levas de fijación a izquierda y derecha
5. Cara frontal
6. Orificio de aceite
7. Superficie de deslizamiento
8. Ranura de aceite, interior
9. Anchura del cojinete

## 6.1 TIPOS DE COJINETES

- Cojinetes radiales: Impiden el desplazamiento del eje en dirección radial. Sirven de apoyo al eje y gira sobre él. Un ejemplo de estos serían los de biela o del árbol de levas.
  
- Cojinetes axiales: Impiden el movimiento del eje en la dirección de este. Sirven como soporte para evitar el movimiento longitudinal del eje. Por ejemplo, los casquillos axiales del cigüeñal para evitar el movimiento al activar el embrague.

La clasificación anterior está basada en el esfuerzo que soportan los cojinetes.

## 6.2 APLICACIONES EN LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

- Casquillo de biela

Las bielas, en su unión al cigüeñal por la cabeza de biela se apoyan sobre estos casquillos. Son dos semicojinetes que se construyen en dos mitades para facilitar su montaje y desmontaje. Están asentados en un mecanizado y sujetas por el sombrerete de biela.

- Casquillos de bancada

Los cojinetes de cigüeñal o casquillos de bancada son los que soportan el giro de este sobre el bloque motor. El número de casquillos de cigüeñal depende del número de cilindros y la construcción del bloque motor.

También tenemos casquillos axiales del cigüeñal, estos controlan el desplazamiento longitudinal dentro del motor. Para controlar que no roce hacia adelante y atrás con el bloque colocamos los axiales.

- Casquillos árbol de levas

El árbol de levas, en los motores de cuatro tiempos, también realiza rotación. Aunque esta sea la mitad de la del árbol motor, necesita casquillos que le sirvan de soporte y reduzcan la fricción. <sup>1</sup>

## 7. METODOLOGÍA

En una conferencia de recubrimientos DLC en una de las asignaturas vistas en nuestro proceso de formación de ingeniería mecánica surgió la motivación y estimulación para aprender profundamente acerca de esta clase de revestimientos (sus usos, sus aplicaciones, sus características y propiedades)

Posteriormente hablamos con el docente Jesús Manuel Gutiérrez Bernal, ya que él es el docente que tiene las herramientas y los conocimientos necesarios para asesoría correspondiente; se planteó realizar un proyecto en el que se profundizaran los conocimientos adquiridos en las materias lectivas de corrosión y recubrimientos, a una parte específica de un motor diésel. Se llegó a la conclusión de trabajar con un cojinete de bancada de acero inoxidable 304.

Este cojinete fue conseguido en una rectificadora en el barrio 7 de agosto. El cojinete de bancada es del motor de combustión interna de una minivan HYUNDAI H1.

El paso siguiente a realizar era solicitar el laboratorio 401 (metales y tratamientos térmicos) de la sede caldas para proceder a cortar probetas de  $3\text{cm}^2$  del cojinete de bancada para realizar las pruebas necesarias. Al mismo tiempo se iba realizando lecturas de libros y artículos científicos relacionados con el tema de recubrimientos DLC para tener fundamentos teóricos para realizar el documento del proyecto.

Se empezó a realizar el documento con los fundamentos teóricos adquiridos en las lecturas de los libros y también empezó la etapa de la teórica del arte basada en artículos de DLC en acero inoxidable 304.

Por lo tanto se llegó a la conclusión de realizar un trabajo de grado netamente teórico basado en los antecedentes de los recubrimientos DLC, esta última fase del proyecto la se realizó investigando profundamente artículos y libros en la bases de datos science direct de la universidad, principalmente los procesos de obtención, las propiedades tribológicas de los recubrimientos y la importancia de cada proceso de obtención de recubrimientos DLC basándonos especialmente en el artículo "diamond like amorphous carbon" J. Robertson

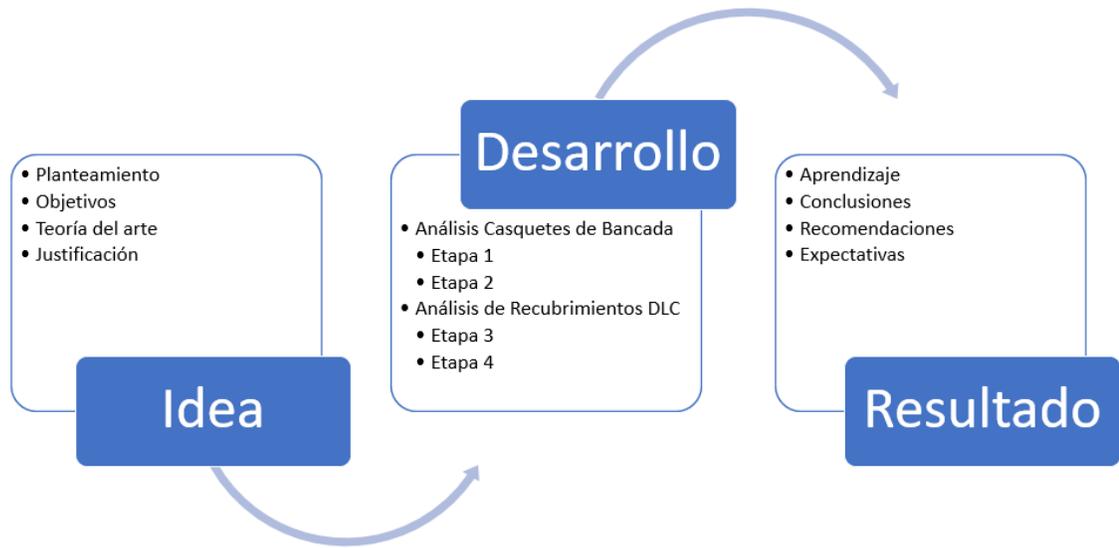


Figura 2, SmartArt Metodología del proyecto

## 8. DESARROLLO DEL PROYECTO

### 8.1 ETAPA 1.

#### COJINETES DE BANCADA

Los cojinetes del motor son unos trozos de material específico con una forma de media luna, estos metales son colocados en los puntos de apoyo en las partes que friccionan, generalmente están ubicados en los puntos de apoyo de la bancada, las bielas, el árbol de levas y el cigüeñal. Mediante una fina capa de lubricante se evita el contacto entre las dos superficies de rozamiento, por consecuencia los motores de combustión interna tienen un mayor desgaste al arranque, porque los casquetes generan fricción directamente sin la película de aceite.

La función principal de este componente del motor es disminuir la fricción entre los ejes y las piezas sobre las que rotan estos ejes. Esta función se logra suministrando una superficie de lubricante para tener un mejor deslizamiento. Además, los cojinetes también deben transmitir el calor provocado por esa fricción. Adicionalmente estas piezas deben tener una superficie de desgaste blanda para que el desgaste lo sufran los cojinetes y no los ejes. Para tener una mayor duración de estos elementos, es fundamental que el motor tenga una buena lubricación, por eso los cojinetes poseen ranuras para un buen engrase.

### COJINETES: BIELA Y BANCADA

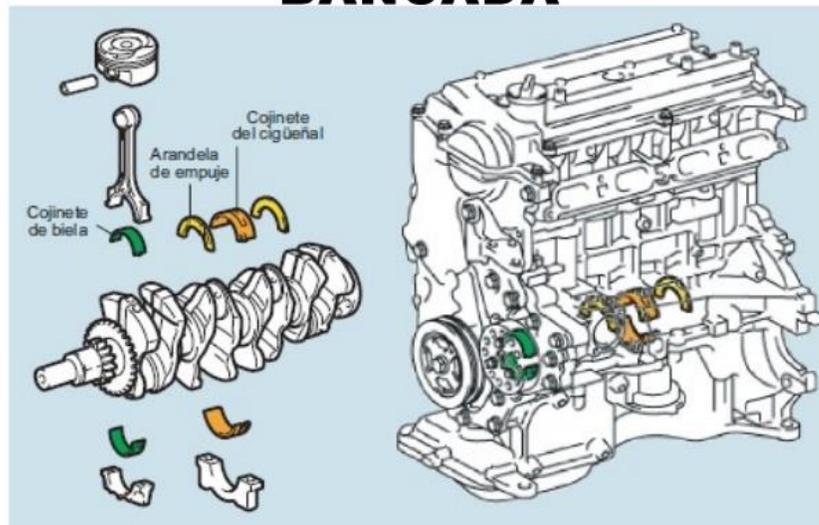


Figura 3 Lugares de trabajo de un cojinete tomada de [Exposicion motores diesel \(slideshare.net\)](http://Exposicion motores diesel (slideshare.net))

Los cojinetes se pueden clasificar por el esfuerzo que soportan, existen dos tipos: radiales y axiales; los cojinetes radiales impiden el desplazamiento del eje en dirección radial. Brindan apoyo y giran sobre el eje, entre este tipo de cojinetes se encuentran los cojinetes de biela o del árbol de levas, ya que brindan el apoyo necesario para un funcionamiento correcto; los cojinetes axiales impiden el movimiento del eje en dirección paralela al mismo. Son un soporte para evitar el movimiento longitudinal del eje, por ejemplo los casquetes del cigüeñal para evitar el movimiento al activar el embrague.

Estos elementos tienen diferentes aplicaciones en los motores de combustión interna: cojinetes de biela, cojinetes de bancada y cojinetes de árbol de levas; los cojinetes de biela son apoyo de las bielas en un unión con el cigüeñal por la cabeza de la biela, estos componentes son dos semicojinetes que se construyen en dos mitades para facilitar su montaje y desmontaje, están colocados en un mecanizado y sujetos sobre el sombrerete de biela; los cojinetes de bancada son los que soportan el giro del cigüeñal sobre el motor de combustión interna y por eso también reciben el nombre de casquetes de cigüeñal, el número de casquetes de bancada depende del número de cilindros que posee el motor, también depende de la construcción del motor, además existen casquetes de bancada axiales que tienen como función controlar el desplazamiento longitudinal del motor, estos casquetes se colocan para controlar que no haya roce hacia atrás o hacia adelante con el bloque; los casquetes de árbol de levas sirven de soporte y reducen la fricción en el árbol de levas, adicionalmente en los motores de cuatro tiempos los casquetes realizan rotación

Estos componentes presentan averías específicas, si algunas partículas extrañas ingresan en la ranura en la ranura de lubricación entre el cojinete y el muñón del árbol, hay la posibilidad de que se presenten graves daños en el cojinete. Debido al espesor deficiente de la película lubricante, las partículas más pequeñas pueden interferir en el funcionamiento y causar una fricción mixta, estas partículas pueden introducirse en la capa de deslizamiento y el revestimiento de rodadura y con ello las partículas pasan a ser inofensivas. De igual manera los bordes que sobresalen se aplanan al conectar con el árbol de levas.

Las partículas no pueden introducirse por completo si estas poseen un mayor tamaño y grosor que la capa de deslizamiento y el revestimiento de rodadura. La parte que sobresale genera el desgaste del muñón del árbol de levas. Un desgaste muy avanzado reduce el tiempo de vida útil y pueden infiltrar una gran variedad de partículas en el circuito de lubricación (gripado) del cojinete.

Las partículas pueden penetrar en el bloque y asentarse allí, en el reacondicionamiento o fabricación de un motor. También pueden generarse partículas de suciedad durante el funcionamiento (aceite carbonizado). Se facilita la penetración de suciedad en el circuito de lubricación debido a un mantenimiento deficiente o agentes exteriores extremos. Los cojinetes adyacentes u otros componentes del motor averiados pueden introducir partículas en el circuito de aceite. El peligro de daños es mayor en el cojinete de bancada que en el cojinete de biela debido a la acción de partículas. Los cojinetes de biela se alimentan con aceite desde los cojinetes de bancada a través de los orificios del cigüeñal, en primer lugar, el aceite recorre los cojinetes de bancada, las partículas más grandes se introducen en el cojinete de bancada y en su mayor parte no penetran hasta los cojinetes de biela. Es útil y necesario hacer un análisis del cojinete y tomar una muestra de aceite para obtener información acerca de la generación de las partículas.

Hay varias causas que generan las averías o daños en estos componentes del motor: montaje sucio, daños en la juntas en la zona del motor, gripado, daños por fatiga, cavitación, mantenimiento deficiente en la lubricación del motor y los residuos; el **montaje sucio** se genera debido a una mala limpieza de los elementos del motor durante el proceso de montaje, esta suciedad puede penetrar en el bloque del motor o también se debe a la falta de atención; los **daños en las juntas en la zona del motor** se evidencian cuando la junta del motor se somete a demasiado esfuerzo o se daña el montaje, debido a esto las partículas pueden penetrar las juntas; el **gripado** se genera a través de que algunos otros componentes del motor (semi cojinetes y pistones) introducen una gran variedad de partículas en el circuito de lubricación, por consecuencia también se generan daños en otros componentes del motor; el **daño por fatiga** se genera si hay roturas en algún componente del motor, el material que es extraído puede penetrar con el aceite en el cojinete y dañarlo; la **cavitación** se genera cuando las partículas se separan del material del cojinete y el aceite continúa arrastrándolas, de acuerdo al tamaño de las partículas se pueden provocar la formación de finas incrustaciones en el cojinete; el **mantenimiento deficiente de lubricación del motor** se genera debido a que los filtros de aceite obstruidos tienden a provocar la acumulación de suciedad en el aceite o también se genera por exceder los intervalos de sustitución; los **residuos** pueden formar sedimentos en el bloque del motor, estos residuos se desprende durante el funcionamiento del motor.<sup>2</sup>

Los cojinetes se hacen de distintos materiales dependiendo de la demanda del motor de combustión interna y a los ambientes a los que se somete el motor de combustión interna al ser un elemento que soportará la fricción deben tener propiedades mecánicas como térmicas con ayudas de lubricantes o materiales de sacrificio , en su mayor cantidad se encuentra el acero con un elevado módulo elástico ya que así da ventaja de fácil adaptación a la cavidad del casquete en su superficie se añade una o varias capas anti fricción para así tener una mejor eficiencia del motor.

Un material para cojinetes debe tener las siguientes características: resistencia a la corrosión, alto régimen de transferencia térmica, bajo coeficiente de rozamiento, resistencia a la compresión, conformabilidad, ser trabajable, penetración y duración; el cojinete debe poseer **resistencia a la corrosión** ya que está expuesto a la acción de los ácidos orgánicos que se forman cuando el lubricante se oxida de forma rápida; **alto régimen de transferencia térmica** si la temperatura aumenta demasiado los cojinetes pueden dañarse ya que al funcionar todos los cojinetes en conjunto generan calor, este calor se puede disipar haciendo circular el lubricante; **bajo coeficiente de rozamiento** el roce o fricción debe ser mínimo cuando haya contacto entre metales; **resistencia a la compresión** el elemento debe soportar grandes cargas y no sufrir ninguna deformación por parte de estas; **conformabilidad** el cojinete debe acomodarse de tal manera que si las superficies los cojinetes nuevos no coinciden se acomoden con el trabajo que ejerce el motor; **trabajable** el material debe ser fácil de trabajar y pulir, además debe ser moldeable; **penetración** el material debe interactuar con pequeñas partículas abrasivas sin que la superficie sufra efectos notorios; **duración** el material debe soportar tensiones, vibraciones y esfuerzos repetidos en otras palabras el material debe ser resistente a la fatiga. <sup>3</sup>

La combinación de algunos materiales nos da grandes ventajas frente a distintos ambientes a los que sometemos nuestro motor de combustión interna.

#### Cojinetes de rosado fundido:

En este cojinete se toma una mezcla heterogénea de plomo con un grano super fino y en el proceso se suprime los poros esta capa es la que actuará como anti fricción al contacto con el muñón del cigüeñal y lejos del respaldo de acero lo que hará que no se adhiera al mismo, Esta solución normalmente es implementada en Motores robustos como son los de tipo Diesel que son turboalimentados o normalmente aspirados con una gran exigencia como pueden ser turbinas.

#### Cojinetes de aluminio estaño 20%:

En este cojinete lo que se hace es alojar estaño en los intersticios del aluminio lo que nos da ventajas muy grandes de resistencia a la carga en este metal blanco que puede llegar a ser de un 80%, por lo tanto da un gran ventaja a la fatiga ya que es esencial al hablar de un sistema que está en constantemente sometido a cargas axiales, siendo así una combinación muy común en motores nafteros o diésel ligeros, como lo son carros comunes.

### Material sinterizado:

Este material es muy común en la fabricación de bujes ya que es muy resistente a los golpes y una elevada resistencia mecánica a la fatiga es por esto que también se puede emplear en los cojinetes ya que al tener estas ventajas son ideales al motor de combustión interna.

### Bimetálicos:

La capa de anti fricción está compuesta por películas de aluminio lo cual nos da una larga vida útil, pero a motores de cargas medianas que no tienen mucha demanda de potencia.

### Bimetálico superior:

En este caso se le añade silicón a las películas de aluminio dando así una mayor confiabilidad ya que aumenta su resistencia a las cargas axiales sometidas al motor de combustión interna su oposición al desgaste incrementa tanto así que no permite grietas que se puedan convertir en concentradores de esfuerzos convirtiéndose en un material frágil y se pueda romper o fisurar, se suele emplear en motores de combustión interna a condiciones normales pero tiene un factor de trabajo que puede hacerlo trabajar bajo condiciones severas y de mayor potencia <sup>2</sup>

### Cojinetes de metal - polímero:

Estos tipos de cojinete poseen una estructura que por lo general está compuesta de un soporte de bronce o acero que le brinda una alta resistencia mecánica, en el intermedio posee una capa de bronce poroso que mejora la resistencia al desgaste, luego de esto al cojinete se le aplica un revestimiento de politetrafluoroetileno (PTFE) para mejoras antifricción. La estructura y el recubrimiento de cada cojinete de bancada son diseñados para dar solución a cada necesidad establecida por la industria automotriz

### Cojinetes termoplásticos de alto rendimiento:

Estos cojinetes están fabricados básicamente con una serie de resinas compuestas con fibras de refuerzo y lubricante sólido. Estos elementos tienen propiedades que ayudan al mejor funcionamiento del cigüeñal y del motor en general ya que proporcionan una excelente resistencia al desgaste y bajos coeficientes de fricción, ya sea en funcionamiento en seco o con lubricación. Además, poseen una excelente estabilidad dimensional, gran fuerza compresiva, resistencia al deslizamiento, baja expansión térmica y buena conductividad térmica.

### Cojinetes de fibras compuestas reforzadas:

Estos cojinetes son fabricados con una variedad de materiales que se obtienen cuando se bobinan filamentos de fibras de vidrio dopados con resinas epoxy (polímeros y pre polímeros reactivos, que contienen grupos epóxidos), sin contar los revestimientos que generan baja fricción y alta resistencia al desgaste, estos cojinetes permiten altas cargas dinámicas y estáticas. Estos cojinetes son especiales para ambientes muy corrosivos como lo es el agua de mar debido a su alta salinidad. Esta composición de fibras compuestas reforzadas brinda una excelente capacidad de carga, resistencia a los golpes, capacidad de carga de borde, excelente resistencia a la corrosión y estabilidad dimensional.

### Soportes de cojinetes autoalineables:

Los cojinetes autoalineables por lo general son fabricados con una amplia gama de materiales específicamente para dar solución a las problemáticas del sector industrial y automotriz. Estos cojinetes poseen unos soportes que tienen diferentes especificaciones; hay soportes que son fabricados con hierro fundido y son diseñados para cojinetes con diámetros internos específicos (10 a 100 mm), también hay soportes fabricados con aleaciones de aluminio con una pequeña parte de acero para cojinetes con diámetros internos específicos (8 a 15mm), por otro lado tenemos soportes con rodamientos autoalineables que son fabricados con hierro fundido y cuentan con una pequeña rueda (rotula) de acero para cojinetes con diámetros internos específicos (10 a 100mm) <sup>4</sup>

### Cojinetes de metales ferrosos:

La fundición gris especialmente con un pequeño porcentaje de grafito es el material más utilizado para la fabricación de cojinetes ya que el grafito sirve como lubricante. La aplicación principal es en el árbol de levas y ejes que deban soportar grandes cargas a una velocidad pequeña y que estén cerca de fuentes caloríficas

### Aleaciones cobre – estaño:

Estas aleaciones pueden ser de 83% a 98% de cobre y del 2% al 15% de estaño. Además, pueden poseer pequeñas cantidades de zinc, níquel y plomo. Estas aleaciones presentan una resistencia al desgaste muy buena y resistencia a la tracción, también son muy resistentes a la corrosión. Con una pequeña cantidad de plomo pueden ser fuertemente cargados y más resistentes a la corrosión de ácidos grasos, ácido sulfúrico y clorhídrico.

### Trimetálicos:

Como su nombre lo indica son diseñados con tres metales distintos cobre, plomo y acero, estos metales hacen un gran trabajo frente a la fatiga que se somete el motor de combustión interna pero son muy propensos a daños causados por la corrosión lo que lo haría un buen candidato a recubrimiento en base DLC, son usados para ambientes controlados a trabajos pesados. <sup>5</sup>



Figura 4 Fuente MS Motorservice Aftermarket ibérica

### Aleaciones de cobre para forjar débilmente aleadas

Estas aleaciones contienen berilio, cromo, cobalto o níquel pueden ser sometidas a proceso térmico, su principal uso es en la elaboración de resortes especiales y para cojinetes de punta de instrumentos sensibles, por medio de estas aleaciones se obtiene alta resistencia a la compresión y a la tracción. Los tres bronce mencionados anteriormente son sometidos a estaño con 4,5% - 8% - 10% de estaño por lo general con un porcentaje del 0,4 de fósforo para endurecer un poco, ya que el fósforo mejora las cualidades de fundición y vaciado. Estos bronce poseen pequeñas cantidades de grafito y mejoran la lubricación creando cojinetes prelubricados, estos cojinetes con grafito no deben ser lubricados con aceite ya que limpian el grafito.

### Aleaciones cobre - aluminio (bronce de aluminio):

Estas aleaciones poseen características muy importantes como los son la buena resistencia a la corrosión, resistencia a la tracción y buena tenacidad, no son aptos para ejes que giran a gran velocidad

### Cojinetes de metal babbit:

Los metales babbit se refieren a metales blandos compuestos de plomo y estaño, además puede tener pequeñas cantidades de antimonio, cobre y algunos compuestos de zinc y estaño. Presentan muy buena condición de conformabilidad y excelente capacidad de penetración. Los materiales babbit se emplean preferencialmente de los bronce por que puedan servir de apoyo a árboles o ejes que giran a altas velocidades

### Cojinetes de bronce y metales no ferrosos:

El término bronce se aplica a una aleación de cobre de estaño, se conocen también aleaciones de cobre y estaño, cobre y plomo, cobre y aluminio, recibiendo el respectivo nombre de bronce de estaño, bronce de plomo, bronce de aluminio en una proporción de cobre mayor o igual a 60%. Algunos de estos bronce contienen sustancias mezcladas para reducir el coeficiente de rozamiento

### Cojinetes metálicos varios:

En algunos casos son metales puros y diferentes a los metales blandos, como por ejemplo cojinetes de cromo y níquel. Presentan un 30% de porosidad aproximadamente del volumen para el aceite del lubricante. Una vez empapados de aceite pueden durar un largo periodo sin lubricación

### Cojinetes de aleaciones:

Son mezclas de metales que se emplean a elevadas temperaturas o en problemáticas que se debe erradicar la corrosión general. Estos cojinetes tienen precios muy altos ya que pueden contener níquel, tungsteno, cobalto, columbio titanio y molibdeno

### Cojinetes no metálicos:

Son para usos especiales hay una gran variedad de materiales no metálicos en la construcción de cojinetes; entre ellos se encuentra caucho, madera, vidrio, carburos, grafito y materiales grafitados, plásticos. Algunos de estos cojinetes en base a la porosidad del material permiten ser pre lubricados. <sup>4</sup>

## 8.2 ETAPA 2.

### PRINCIPALES PROPIEDADES A TENER EN CUENTA EN EL COJINETE DE BANCADA

Al tomar un elemento como los cojinetes de bancada podemos hablar de un elemento de sacrificio, que así mismo debe tener grandes propiedades para cumplir su función de manera eficiente en la etapa 1 hablamos de ventajas mecánicas que nos da ciertas aleaciones de los metales blancos que actúan en la periferia del cojinete, pero hay ciertas propiedades que siempre deben tener estos elementos de sacrificio ya sea para el cigüeñal, árbol de levas y las bielas

Generalmente los cojinetes de bancada tienen unas muy buenas propiedades de fusión y colada ya que al momento de someterse a grandes temperaturas no se afecte su composición ni se llegue a una oxidación en términos de temperatura al momento de hablar de este metal blanco que utilizamos de antifricciónante tiene una gran adherencia a su metal base, es decir, el material del cojinete al momento de sufrir el revestimiento del metal blanco debe adherirse fácilmente a este para que se hable de un solo elemento, al momento de hablar de bajas temperaturas la contracción del material no sufre grandes cambios, lo que hace que no se alteren sus propiedades llevándolo así a una vida útil más prolongada.

Este metal blanco tiene unas propiedades muy interesantes, en su estructura en el cual se hallan dos fases, es decir, se genera una matriz dúctil que a su vez se le añaden partículas duras siendo así que estas partículas son las que resisten la carga a las que se somete el cojinete y la matriz dúctil aporta una gran conformabilidad y esto no solo nos aporta propiedades en este sentido al ser un elemento de sacrificio se desgasta, por lo tanto al tener una matriz dúctil se deteriora uniformemente lo que causa que queden asperezas de las partículas duras, es decir, el material sufre desgaste tanto en su zona dúctil como en sus partículas duras pero la zona dúctil tiende a sufrir un desgaste de forma más rápida por lo cual las partículas duras sobresalen y quedan asperezas esto es una gran ventaja ya que actúa como cavidades donde se puede alojar el lubricante como lo deseado en las camisas de los bloques en los que trabajan los pistones, intentando generar pequeñas cavidades para el lubricante y así generamos una mejor eficiencia térmica.

Las aleaciones mencionadas anteriormente generan una gran resistencia a la fatiga siendo así que este elemento soporta varios ciclos de trabajo, debemos mencionar que esta resistencia no solo se basa en un solo metal o algunos, sino por el conjunto de la aleación, hablando de propiedades de estos elementos debemos decir que su geometría es bastante amena con el ambiente en el que trabaja en esta no se hayan cambios bruscos como lo pueden ser ángulos rectos, se suele tener mucho cuidado en los empalmes para no generar concentradores de esfuerzos y así perder

esa matriz dúctil convirtiéndola en una frágil que pueda fracturarse con daños severos para el motor de combustión interna.

Acá en el momento que hablamos de corrosión hablamos de una propiedad que se necesita dentro del cojinete ya que está sometido a lubricantes y por lo tanto a erosión y lo cual genera una gran rugosidad en el metal blanco cualquiera de las fases de estos compuestos llega a ser atacado por corrosión puede llevar a crear debilidades en este elementos lo que puede desencadenar procesos sumamente peligrosos dentro del motor de combustión interna , esta corrosión se puede dar por oxidación de algunos aceites implementados para la lubricación del motor de combustión interna o el agua marina cuando utilizamos motores para hidroeléctricas, lo cual lo hace un gran candidato a un recubrimiento en base DLC (diamond like carbon) por sus demanda de un recubrimiento tanto corrosivo como antifriccionante.

Algo antes mencionado es que este elemento tiene diversas aleaciones para ciertas demandas que se tiene con un motor de combustión interna pero una propiedad que mantienen todos es que al hablar de un componente que no se deforme de forma general ya que pierde propiedades para lo que está hecho como lo es resistencia térmica y resistencia a la fatiga como lo puede ser dilatándose o sufriendo un gran contracción su desenlace es sufrir deformaciones significativas que puede desembocar en ruptura y pérdida del componente, pero que si se pueda deformar de forma local ya sea para adaptarse a la cavidad donde desarrollará sus funciones o lo dicho antes generar pequeñas cavidades donde se aloja pequeñas cantidades de lubricante para un mejor movimiento mecánico del motor y no sufrir demasiadas pérdidas en términos de potencia es decir un límite elástico lo suficiente para no sufrir grandes deformaciones pero si bastante bajo para sufrir esas pequeñas deformaciones.

los metales babbitt pueden ser a base estaño o a base plomo explicado anteriormente con las propiedades que nos aportan , pero simplifiquemos un poco y digamos que las de base estaño nos dan propiedades térmicas ,es decir, disipar calor y las base plomo tienen mejor resistencia a la corrosión por algunas soluciones amoniacales o ácidos en general como de otros entes que nos afecten en términos corrosivos aunque al ser a base plomo estas aleaciones son cada vez más escasas por su grandes problemas renales, tóxicos y hasta neurológicos por lo tanto se opta por otras aleaciones antes mencionadas que cumplen con las mismas propiedades y no generan estos problemas, estos dos tipos de babbitt tienen en sus aleaciones antimonio y cobre que nos generan dureza , el resto de elementos pueden variar dependiendo de la demanda del motor como antes mencionamos , pero todas las aleaciones no exceptúan las propiedades de ductilidad , resistencia a la corrosión y colabilidad , por lo tanto estas aleaciones se rigen por una normativa

**ASTM B23**, nos describe especificaciones de aleaciones de metal blanco basándose en alguna de las dos bases ya sea estaño o plomo con su porcentaje en composición química, límite elástico que se rige por la magnitud de Mega pascales a una temperatura de 20°C y su dureza brinell a 20°C y 100°C.

Aleación	Base	Composición química (%)				Límite elástico (MPa) a 20°C	Dureza (HB)	
		<i>Sn</i>	<i>Sb</i>	<i>Pb</i>	<i>Cu</i>		20° C	100° C
Tecnofric 101	Sn	90-92	4-5	0,35	4-5	16,9	17,0	8,0
Tecnofric 102	Sn	88-90	7-8	0,35	3-4	23,1	24,5	12,0
Tecnofric 103	Sn	83-85	7,5-8,5	0,35	7,5-8,5	36,9	27,0	14,5
Tecnofric 107	Pb	9,3-10,7	14-16	72-75,5	0,50	17,2	22,5	10,5
Tecnofric 108	Pb	4,5-5,5	14-16	77-80	0,50	18,3	20,0	9,5

Tabla 1 tomada de: <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/astm?c=073337>

Esta tabla nos describe el revestimiento de babbitt que hace parte de un cojinete que es hallado comercialmente así que se estandarizó para conocer sus propiedades y así disponerlo a sus demandas dando así un nombre estándar a cada aleación.

Destacamos que un babbitt que en su aleación contenga una menor cantidad de elementos tiende a ser menos resistente a la compresión lo cual si sometemos un cojinete revestido de este babbitt a trabajos de alta demanda falla debido a que no soporta cargas y pierde su propiedad de resistencia a la fatiga que es esencial en este elemento y ya si sobrepasamos y llenamos la aleación es más propenso a sufrir fisuras y como antes hablado a problemas corrosivos , es esencial saber el punto de equilibrio para llegar a una aleación antifriccionante requerida.

Es por esto que a ciertas aleaciones ya estándar se les selecciona para ciertos trabajos a desempeñar ya que estos componentes anti fricción han dado muy buenos resultados como hemos estudiado anteriormente las posibles aleaciones son diversas para cada ambiente de trabajo y también sus diferentes geometrías nos dan soluciones como lo pueden ser motores con grandes momentos y bajas velocidades o pequeñas momentos a grandes velocidades entre los innumerables ambientes en los que se desempeña un motor de combustión interna hoy en día y todo basándonos en la aleación del babbitt y su geometría.

Designación TECNOFRIC	Base	APLICACIONES
101	Sn	Esfuerzo, choque elevado, cargas normales
102	Sn	Cojinetes de turbina, compresores centrífugos
103	Sn	Cargas elevadas, turbinas, bombas, laminadores
111	Sn	Carga superior a la 101, choque normal
109	Sn	Cojinetes de turbinas, compresores alternativos
107	Pb	Propiedades de deslizamiento y carga normales
108	Pb	Sellos compresores centrífugos, generadores, papeleras
113	Pb	Cojinetes cabeza de biela para compresores alternativos
115	Pb	Cojinetes compresores alternativos

Tabla 2 tomada de: <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/astm?c=073337>

Este diagrama nos facilita los usos más habituales de los metales babbitt según sus aleaciones.

### TIPOS BÁSICOS DE ALEACIONES

Nomenclatura TMC



MATERIALES MATERIALS - MATÉRIAUX			COMPOSICIÓN % COMPOSITION %				
TECNOFRIC	ASTM	DIN	Sn	Sb	Cu	Pb	Other
101	B23/1		90/92	4/5	4/5	-	-
102	B23/2		88/90	7/8	3/4	-	-
103	B23/3		83/85	7,5/8,5	7,5/8,5	-	-
111	B23/11		86/89	6/7,5	5/6,5	-	-
109		LgSn80	80	12	6	2	-

TECNOFRIC	ASTM	DIN	Pb	Sb	Sn	Cu	Other
107	B23/7	LgPbSn10	74,5	15	10	0,5	-
108	B23/8	LgPbSn6Cd	79	15	5,5	0,5	Cd<0,05
113	B23/13		85	10	5	-	-
115	B23/15		82,5	16	1	0,5	-

Tabla 3 tomada de: [https://www.interempresas.net/Componentes\\_Mecanicos/Articulos/46726-Cojinetes-de-metal-antifriccion.html](https://www.interempresas.net/Componentes_Mecanicos/Articulos/46726-Cojinetes-de-metal-antifriccion.html)

Este esquema nos permite saber el nombre de la aleación y su composición química según la norma **ASTM B23**.

La lubricación de un cojinete se produce por la formación de una capa de lubricante entre la superficie del cojinete y el eje. La presión que se desarrolla en esta capa, tiene que hacer flotar el eje sobre el cojinete. Si el cojinete se ha fabricado correctamente, y si funciona en condiciones ideales, la película continua de aceite separa siempre las dos superficies metálicas, evitando el contacto. Cuando el cojinete no trabaja en las condiciones óptimas, la película de aceite lubricante se rompe localmente o completamente, y da como resultado zonas de fricción metal-metal, afectando a las superficies de los dos componentes en contacto y provocando gripaje.

En resumen, la conformabilidad de las aleaciones Babbitt permite a la carga repartirse de manera uniforme en toda la superficie del cojinete, y así establecer con más rapidez el régimen hidrodinámico necesario, pues tienen capacidad para adaptarse con gran exactitud a la superficie más dura con la que están en contacto.

Los cigüeñales son los componentes del motor más sometidos a estrés y los que presentan fallos más habituales por fatiga, siendo la principal causa de origen de los daños en los motores de combustión interna. La fatiga es un fenómeno que resulta de cargas cíclicas con niveles de tensión inferiores al límite elástico o la resistencia máxima del material. Una vez que un cigüeñal está forjado o fundido, sus muñones y superficies de cojinete se mecanizan perfectamente lisas. Los muñones deben ser más duros que sus cojinetes para garantizar que se produzca cualquier desgaste en los casquillos de cojinetes reemplazables y no en el cigüeñal, que debería durar toda la vida útil del motor. El proceso de fabricación del cigüeñal generalmente incluirá el endurecimiento de los muñones y los muñones mediante nitruración u otro tratamiento térmico.

Un muñón es la parte de un eje que gira dentro de un rodamiento, y hay dos tipos de muñones en un cigüeñal: los muñones principales forman el eje de rotación; Las muñequillas están conectadas a los extremos de la biela, que llegan hasta los pistones. Los muñones principales están sujetos al bloque del motor y es alrededor de estos muñones donde gira el motor [1].

Un cigüeñal es la parte de un motor que traduce el movimiento de pistones lineales alternativos en un movimiento giratorio. Funciona con torsión armónica combinada con esfuerzo de flexión cíclico debido a cargas radiales de presión de la cámara de combustión, transmitidas desde los pistones y bielas, a las que hay que sumar las cargas de inercia de pistones y bielas. También se perforan orificios de equilibrio en los contrapesos para equilibrar el cigüeñal. Sin tal equilibrio, la acción de lanzamiento de manivela creará fuertes vibraciones, particularmente a velocidades más altas, pudiendo dañar el motor si tales vibraciones no son controladas. [2-3]

El análisis de fallas se trata de un motor Diesel dañado de una conocida marca de automóviles. Pertenecía a un vehículo en particular (103 kW a 4000 rpm, par máximo 320 Nm a 1750 rpm, 1968 cm<sup>3</sup> de desplazamiento) que falló después de 180.000 km y 8 años en servicio. Los diámetros de los muñones y los muñones principales son 51,90 mm y 52,90 mm, respectivamente. El motor es de inyección indirecta, sobrealimentado, con una presión máxima de combustión de 140 bares, 4 pistones y 81,0 mm de diámetro del cilindro [4]

La falla del cigüeñal y la tapa del cojinete principal se debió al modo de fatiga, después de que la tapa del cojinete principal se colapsara antes. La causa principal parece ser un apriete inadecuado (par) de los pernos de la tapa del cojinete principal revelados por vestigios de desgaste por rozamiento, y una alta concentración de tensión en el lado exterior de la tapa debido a la geometría irregular (molde de fundición deficiente) cerca de la parte superior de la tapa agujeros. La carga fluctuante ejercida en la tapa interior del cojinete principal debido al desajuste entre los muñones principales (efecto de debilidad de la tapa principal) y la alta fuerza transmitida por el extremo de la biela ejercida sobre la superficie de la muñequilla, introdujo una carga de flexión alterna significativa (deflexión) en la manivela. Las tapas de los cojinetes de bancada deben tener un mejor control de calidad para reducir la tensión de concentración en el lado exterior de la tapa de la tapa, y un ajuste previo adecuado de los pernos de las tapas de los cojinetes de bancada. [4].

Es importante conocer las propiedades de algunas otras partes de la bancada del motor, como el cigüeñal, es por estas propiedades que se mencionan a continuación que el cojinete de bancada no sufre cambios generales, sino cambios específicos que lo hacen adaptarse a su ambiente de trabajo

Para conocer las propiedades reales de un cigüeñal se cortó el segmento del eje en probetas de 3 mm, obteniendo un límite elástico (YS) de 480 MPa, límite elástico (UTS) de 758 MPa, módulo de elasticidad de 207 GPa, alargamiento total de 20,6%. El valor máximo de tensión verdadera fue igual a 870 MPa. Estos resultados fueron realizados mediante la prueba de tensión realizada en una máquina de tensión zwick-roell [5-6]

El cigüeñal analizado está hecho de acero al carbono 45. Este acero consta de 0,42 a 0,50% de carbono y se utiliza comúnmente en ingeniería mecánica. En la Tabla que se muestra a continuación, las propiedades mecánicas del material del cigüeñal (basadas en los resultados de la prueba de tensión) se comparan con el valor estándar para el acero 45.

Properties	Symbol	Unit	Crankshaft material (real value)	Steel 45 (according to standard), (2017 )
Ultimate tensile strength	UTS	MPa	758	560-850
Yield stress	YS	MPa	480	275-490
Young modulus	E	GPa	207	198-207
Total elongation	$\epsilon$	%	20.6	14-17

*tabla 4 Propiedades mecánicas del material del cigüeñal y el valor estándar para el acero 45*

Como se ve en esta tabla, la resistencia máxima a la tracción, el límite elástico y el módulo de elasticidad del material del cigüeñal están en el rango definido por la norma (DIN EN 10083-2, 2017). El alargamiento total del material del cigüeñal (= 20,6%) es solo un poco mayor que el valor estándar (14-17%). [7]

Basándonos en las propiedades anteriores de la tabla de 1 que nos muestra las principales aplicaciones con respecto a las propiedades que nos arrojan las aleaciones desglosamos un poco más de estos tipos de aplicaciones y donde los podemos utilizar:

#### Con aleaciones a base de estaño:

Se pueden desempeñar en estas aplicaciones, ventiladores industriales con características de centrifugado, con una alta demanda de velocidad o rotativos con aletas deslizantes allí se pueden desempeñar fácilmente, también se desempeñan en engranes o levas en extractores o separadores en rodamientos de pedestal y en motores de encendido por compresión, es decir, motores de combustión interna tipo Diesel se hallan en las bielas y crucetas de conexión del cigüeñal principal e igualmente en los compresores, en motores eléctricos su aleación se adapta al ambiente donde se encuentra los rotores principales y en la mayoría de los rodamientos en bombas recíprocas en el cigüeñal, en el cabezote y en las tapas de las bielas motores de vapor en sus crucetas y bielas y en las turbinas los cojinetes principales están hechos de este tipo de aleaciones con base en de estaño grado 1 - 11.

#### Aleación de plomo, antimonio y arsénico:

Esta aleación tiene un gran campo de aplicación algunos se ubican en ventiladores en todos sus cojinetes, en procesos de centrifugado también como los de base de estaño están en los cigüeñales de motores Diesel, en los compresores todos sus cojinetes están hechos de esta aleación, es decir, era un gran candidato para que lo cojinetes tuvieran las propiedades requeridas para las demandas de trabajo, pero por su alto riesgo tóxico se toman variantes antes mostradas que llevan en su base estaño como anteriormente lo presentamos o distintas aleaciones buscando distintas propiedades que nos ayudan en ciertas demandas como antes explicamos.

Cabe resaltar que dentro del base de estaño la aleación más utilizada es TECNOFRIC 102 por su facilidad para adaptarse al medio de trabajo para las aplicaciones más críticas se suele usar TECNOFRIC 109 por su antimonio es fácilmente dilatable al enfriarse y produce vaciados finos.

No solo debemos tener en cuenta las propiedades del cigüeñal sino también las propiedades del material del soporte según TMCOMAS para los motores de calidad más exigente se utiliza acero de construcción st52, 3 - st37 y se hacen tratamientos térmicos para homogeneizar la estructura y maximizar estados ferríticos en el acero

Para demandas de trabajo de clase media se utiliza el bronce puesto que permite un buen anclaje químico mediante la formación del Inter metálico pero no admite tratamientos térmicos por lo tanto tiene una alta transferencia de calor.

y por último hallamos procesos de fundición deben ser tratados para maximizar la presencia de ferrita y no tiene un anclaje químico lo cual es algo que no conviene a los cojinetes de bancada por lo tanto se utilizaba ya no es muy común en clases de calidad baja por lo tanto baja demanda de potencia y no muy confiabilidad.

### 8.3 ETAPA 3

#### PROCESOS DE OBTENCIÓN DE RECUBRIMIENTOS DLC

Desde la parte teórica nos desenvolvemos en dos términos globales que abarcan la mayoría de procesos de obtención, los cuales son llamados PVD y CVD por sus siglas en inglés.

PVD partimos de un material o aleación para recubrir un sustrato en su fase de sólido el cual se pretende crear una delgada película sobre el sustrato, estas técnicas pueden ser el calentamiento que es la forma física o bien se “pulveriza” mediante bombardeos energéticos de partículas cargadas en forma de iones hacia el material o aleación

En el proceso de calentamiento es llamada “evaporación térmica en vacío”. Se pretende evaporar el material hasta la evaporación condensándose en forma de película delgada sobre la superficie del sustrato y las paredes de cámara de vacío normalmente estos procesos se hacen a presiones muy bajas del orden de  $10^{-6}$  y  $10^{-5}$  torr para así evitar reacciones parásitas del vapor con la presión del medio ambiente. Con estas presiones el camino libre medio (distancia para la colisión de partículas) es del rango de la cámara de vacío por lo tanto se vuelve un sistema lineal desde la fuente, es decir, el crisol hasta el sustrato.

Esta técnica da fenómenos de “sombreado” sobre geometrías complejas en 3D más que todo en las superficies que el crisol ataca en segunda instancia, este proceso da una energía media a los átomos muy baja del orden de  $Kt$  ( $4.11 \cdot 10^{-21}$  julios) lo cual hace que los átomos que llegan al sustrato se alojen de forma desordenada, es decir, películas amorfas que nos desembocan en una película porosa y con mucha rugosidad afectando en gran medida la adherencia del recubrimiento.

Este proceso de evaporación térmica al vacío se puede desarrollar de distintas formas:

Calentamiento mediante una resistencia:

Este proceso de evaporación térmica se desarrolla mediante un filamento o placa metálica el cual fluye una carga eléctrica sobre el cual se coloca el material de recubrimiento así el material llega a su punto de fusión y se evapora justo encima de él se encuentra el cual se condensa en el sustrato el cual recibe la evaporación y se recubre en la periferia.

Este método de fluir corriente eléctrica también lo podemos obtener en bobinas el cual consiste de un filamento enrollado en forma de espiral el cual en su núcleo se encuentra el crisol de grafito o de Bn (nitruro de bromo) y así esta aloja el material que se desea evaporar.

Los filamentos suelen ser de Molibdeno (Mo), Tantalio (Ta), Wolframio o Tungsteno (W), estos se usan por su baja presión de vapor es decir casi no generan vapor a su punto de fusión los cuales oscilan entre los 1000-2000°C, así no generan partículas no deseados entre la fase de condensación del recubrimiento en el sustrato.

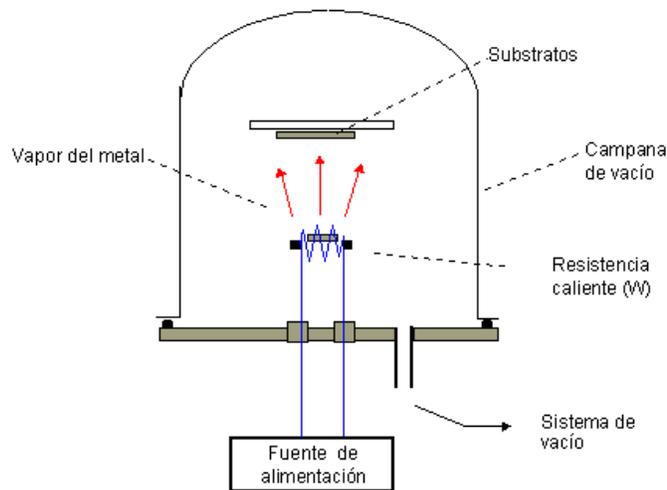


Figura 5, Calentamiento mediante resistencias, tomada de: [https://www.icmm.csic.es/fis/espa/preparacion\\_ff.html](https://www.icmm.csic.es/fis/espa/preparacion_ff.html)

### Evaporación de calentamiento mediante un haz de electrones:

Se bombardea con una haz de electrones el material que se requiere para cumplir el proceso de recubrimiento, esto se hace mediante un cañón de electrones mediante una emisión termoiónica producida por un filamento incandescente en este caso el cátodo, en este caso el ánodo puede ser el mismo crisol o un disco perforado situado en las proximidades, normalmente se suele disponer de un campo magnético que hace que los electrones inciden en el material de recubrimiento así no teniendo que situar el cañón directamente para que no intervenga en la evaporación del material.

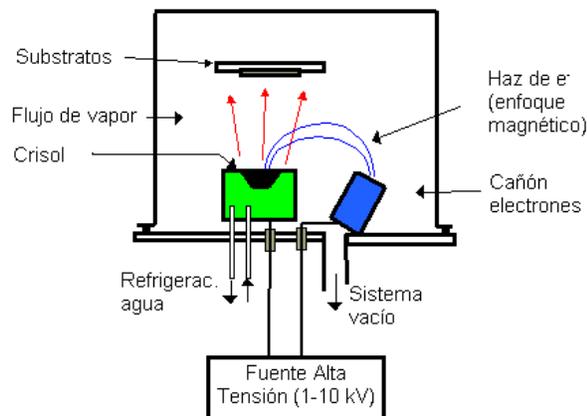


Figura 6 Evaporación mediante haces de electrones tomada de : [https://www.icmm.csic.es/fis/esp/preparacion\\_ff.html](https://www.icmm.csic.es/fis/esp/preparacion_ff.html)

En el artículo científico “Innovative technical solutions for evaporation of multilayer coatings by EB-PVD method” se presentan variables importantes en el método EB-PVD (deposición física de vapor por haz de electrones). La evaporación de materiales por bombardeo con haz de electrones (EB-PVD) permite la evaporación de materiales infusibles (que no se pueden fundir), creando así oportunidades únicas para la instalación de revestimientos funcionales.

En este caso los autores del artículo expuesto presentaron un diseño innovador de crisol (crisol modular de múltiples posiciones) que consta de cuatro módulos de acuerdo con la división de materiales en cuatro grupos, es decir, materiales de alta conductividad térmica, materiales de baja conductividad térmica, materiales refractarios y materiales de sublimación que proporcionan diferente intensidad de enfriamiento para realizar un mejor recubrimiento.

Lo que hace esta propiedad es permitir la evaporación eficiente de varios materiales en el mismo proceso tecnológico, que es esencial para componer revestimientos compuestos, es decir, multicomponente, composite y multicapa.

Esta técnica del crisol modular de múltiples posiciones es una alternativa positiva ya que es muy eficiente y accesible económicamente; debido a que el método EB-PVD presenta unas desventajas que son el costo muy alto del equipo y las dificultades de construcción que resultan de la necesidad de eliminar la interacción de los sistemas de deflexión de cada cañón de electrones y también la necesidad de crear un sistema sofisticado para controlar el funcionamiento de cada cañón de electrones y sistema de seguridad por radiación de rayos X. [8]

Otra forma de PVD es llamada como “sputtering” o “bombardeo catódico” son caídas eléctricas en dos electrodos que tienen la forma de la materia plasma con gases no reactivos usualmente se utiliza el Argón ( Ar ) ,el cual se basa en una bombardeo hacia uno de los do electrodos con partículas sumamente cargadas en forma de iones a esto le llamamos “pulverización” lo que causa un intercambio de momento entre los iones y los átomos del electrodo , en términos generales de lo que hablamos es de un ataque al electrodo esto normalmente lo hacían para limpieza de superficies así evitando rugosidades y porosidades , pero al momento de hacer esta técnica el material del electrodo genera un vapor lo cual es altamente aprovechable para que se condense en algún sustrato creando películas , básicamente lo que sucedía en el proceso de evaporación térmica .

Este proceso tiene muchas derivaciones pero todos mantienen el concepto básico de hablar de un blanco (recubrimiento) lo tomamos que es el material el cual se atacará y será depositada de forma catódica en la descarga luminosa lo cual hace que todo estos átomos se depositen en forma de película sobre el sustrato podemos usar como blancos metales puros como aleaciones por medio de descargas de gases nobles , para esto usamos generadores de tensión, bombas de vacío, algunas veces por encima del blanco colocamos protección para que el proceso no tienda generar entropía y una placa anódica que soporta a el sustrato para completar el proceso electroquímico.

Una de estas técnicas de sputtering es el “sputtering magnetrón balanceado” el cual se trata de campos magnéticos estratégicamente situados al campo eléctrico completamente balanceados.

Este es un proceso físico en el que los átomos pasan de un estado líquido al estado gaseoso (vaporización) de un material sólido denominado “blanco” mediante el bombardeo de iones, es causado principalmente por las colisiones generadas entre los iones energéticos y átomos del material

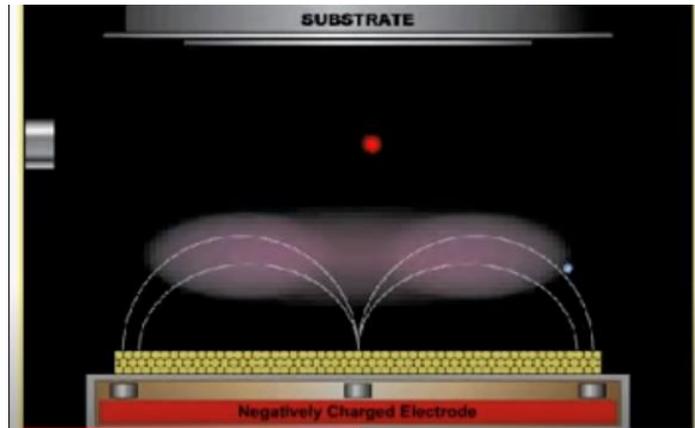


Figura 7 , Sputtering magnetron tomada de <https://www.youtube.com/watch?v=Hf2kkqZhL7U>

Como decíamos anteriormente atacamos el material del recubrimiento (átomos amarillos ordenados) con iones (punto rojo) y así “pulverizamos” el recubrimiento y lo alojamos en el sustrato , como mostramos en esta imagen vemos dos nuevos elementos el cual son los campos magnéticos esto dan grandes e importantes cambios dentro del proceso de sputtering , formando arcos balanceados (ondas blancas ) y electrones secundarios que no bombardean el sustrato porque se alojan en las ondas balanceadas que rota de forma cíclica , lo que no existan energías parasitas dentro del proceso que desembocaban en aumentos de temperatura en el sustrato al recibir la condensación de la evaporación del recubrimiento y daños radiactivos en el mismo , es decir , es un cambio adaptado a la técnica de recubrir por este método.

Lo cual es permite que podamos tener sustratos que anteriormente podrían sufrir daños térmicos o radiactivos como polímeros o superficies sensibles para ciertas demandas de trabajo, un valor agregado que tiene esta técnica mejorada es que sus velocidades de deposición son superiores a las de un “sputtering” tradicional lo cual es de gran ayuda en tiempo y recursos.

Es decir, un ion incide sobre un grupo de átomos muy juntos y ordenados (átomos del blanco). Los átomos son expulsados de la superficie del blanco dirigidos hacia un sustrato sobre el cual se depositan formando una superficie muy fina. Un aspecto muy importante para este recubrimiento es la técnica de vacío, la cual se realiza a presiones de  $10^{-2}$  a  $10^{-4}$  torr ya que se proporciona un excelente aislamiento térmico y eléctrico.

El camino libre medio de las partículas gaseosas puede ser tan grande que las partículas no chocan entre sí, por lo tanto, llegan al sustrato con altas energías. La cámara es evacuada a presiones de  $10^{-7}$  torr y llenada con un gas (inerte) hasta la presión de trabajo, lo que hace que se disminuya la cantidad de constituyentes activos de la atmósfera, permitiendo obtener materiales de baja contaminación. el blanco se conecta a un voltaje negativo y el sustrato generalmente está enfrentado al blanco.

En estas condiciones se aplica una diferencia de potencial que produce la ionización de una porción de gas. Los iones producidos son acelerados por el campo eléctrico golpeando el blanco o cátodo, arrancan átomos neutros del blanco, algunos de los cuales se ionizan, provocando así una avalancha de ion-electrón que formarán el plasma. Los voltajes de operación están entre -200 y -500V.

En un magnetrón convencional, el plasma es muy limitado a la región del blanco. Una región de plasma denso por lo general se extiende unos 60 mm de la superficie del blanco y películas crecidas sobre sustratos colocados dentro de esta región serán sometidas a un bombardeo de iones concurrentes que pueden influir fuertemente en la estructura y propiedades de la película en crecimiento. Sustratos colocados fuera de esta región, se encontrarán en una zona de baja densidad del plasma. En consecuencia, la corriente de iones dibujada en el sustrato (usualmente,  $<1\text{mA/cm}^2$ ), es generalmente insuficiente para modificar la estructura de la película. La energía de los iones bombardeantes puede incrementarse mediante el aumento de la tendencia negativa aplicada al sustrato, sin embargo, esto puede conducir a defectos en la película e incrementar el estrés de la película, y por lo tanto, ser perjudicial para las propiedades de la película en general. Por esta razón, es difícil depositar películas muy densas y grandes o componentes complejos utilizando magnetrones convencionales. [9]

En el artículo “Research on UV attenuating nanocoatings on glass using PVD by sputtering” se depositan una serie de películas delgadas sobre sustratos de cal sodada mediante la técnica de pulverización catódica con magnetrón PVD, variando ciertos parámetros de deposición para obtener una variedad de propiedades. El nitruro de titanio (TiN) es una cerámica que se utiliza principalmente para mejorar la resistencia y las propiedades tribológicas en sustratos como acero, titanio, aluminio y carburo de tungsteno en una variedad de campos que van desde las prótesis biomédicas hasta la maquinaria pesada.

Además de sus conocidas propiedades mecánicas, propiedades novedosas como su comportamiento eléctrico extremo en circunstancias específicas han hecho que los investigadores profundicen en otras áreas de investigación, incluida la óptica. En esta área, propiedades interesantes como tener una alta reflexión en la región infrarroja y mantener una baja reflexión en la región visible representan un área de

posibilidades de investigación. Los autores del artículo profundizan las propiedades ópticas de películas delgadas de nitruro de titanio (TiN) correlacionándolas con su morfología mediante espectrofotometría, SEM y AFM. Se llega a la conclusión que las películas de nitruro de titanio (TiN) pueden ser útiles para aplicaciones que involucran atenuación del rango UV. Estudios obtenidos muestran que la reducción del consumo de energía en los procesos de magnetrón debe centrarse en la etapa de recubrimiento, ya que esta es la que más energía consume en todo el proceso. La fuente de corriente directa (DC) sigue siendo la fuente más utilizada en el magnetrón de pulverización catódica. La fuente de radiofrecuencia (RF) es menos utilizada, aunque la aparición de la fuente de MF ha traído nuevas oportunidades, permitió la combinación de las dos fuentes y propició la aparición de nuevas técnicas como el DAS que permiten reducir la carga térmica en el sustrato [10-11]

Pero si también atacamos con iones el sustrato durante el proceso de evaporación haciendo que se genere más energía molecular del desprendimiento atómico del recubrimiento para así reducir la Inter capa haciendo que se genere mejores propiedades como la adherencia, una mayor densidad ya que alojaremos átomos en donde había sustrato.

Este método es denominado “deposición asistida mediante haces de iones” (IBAD, Ion beam assisted deposition), lo cual es añadir un cañón de iones que tienen como “pulverizar” el sustrato.

Esta fuente de iones es de un selectivo llamado “kaufmann” es un cañón de 3 cm de diámetro el cual permite variar la intensidad de este haz en un intervalo de 0 a 40 mA con control autónomo de la energía de los iones en intervalos de 0,1 a 1,2 Kev (electronvoltio , variación de energía que puede oscilar en un electrón) , este cañón tiene un gran ventaja y es que se puede alinear a las geometrías del sustrato lo cual permite estudios de “sputtering” variando el ángulo en el que inciden los electrones hacia el sustrato.

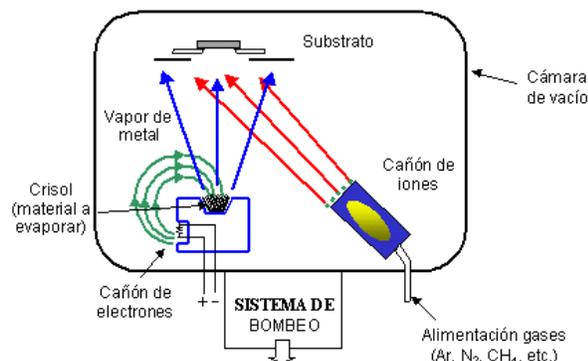


Figura 8 IBAD tomada de : [https://www.icmm.csic.es/fis/espa/preparacion\\_ff.html](https://www.icmm.csic.es/fis/espa/preparacion_ff.html)

El artículo “Structure, hardness and adhesion of thin coatings deposited by PVD, IBAD on nitrated steels” analiza pruebas de microestructura, mecánicas y físicas y en algunos recubrimientos. Con muestras de nitrato de titanio producidas en una cámara de vacío DANFISIK por medio del método (IBAD). Las propiedades y la calidad de los recubrimientos de deposición asistida por haz de iones (IBAD) dependen de muchos parámetros del proceso, como la energía iónica, la relación de llegada ion a átomo, el ángulo de incidencia del ion, la presión, la temperatura, etc. Esta es la razón por la que los recubrimientos IBAD deben planificarse con mucha precisión. Se llegó a la conclusión que El proceso IBAD generalmente conduce a cambios significativos en las propiedades del recubrimiento. Estas propiedades mejoradas son consecuencia de la densa estructura microcristalina. [12]

Después de señalar e indicar los procesos físicos (PVD), analizaremos el proceso químico de un recubrimiento por DLC es decir “Chemical Vapor Deposition” o sus siglas en inglés (CVD).

El Chemical Vapor Deposition (CVD), se basa en la reacción de gases que se mezclan dentro de una cámara de vacío o simplemente un reactor, así mismo estas reacciones son las que suelen adherirse al sustrato creando una pequeña capa delgada en la periferia del mismo, algunas reacciones que no se desean en este proceso son suprimidas del sistema con ayuda de sistema de bombeo de grandes velocidades (roots y rotatorias).

Dentro del proceso Chemical Vapor Deposition (CVD) podemos hallar dos tipos y esto depende de la presión en el reactor, es decir, que ocurra a presión atmosférica es llamado “atmospheric pressure chemical vapor deposition” (APCVD), o reduciendo la presión “Low pressure chemical vapor deposition” (LPCVD) donde la presión oscila menor a 1 torr.

APCVD es simple , no se requiere bombas que generen vacío el reactor se calienta lo cual da paso a que los gases ingresen al sistema, esto genera una sobrepresión en el sistema evitando un reflujo es decir que ingrese aire atmosférico en el apartado de expulsar los gases , anteriormente a comenzar el proceso se purga la atmósfera de aire y se hace con algún gas que no cause reacciones químicas para que no se generen reacciones que no son deseadas en el proceso de recubrir el sustrato , esta técnica reduce bastante la cantidad de elementos que se utilizan en un proceso de CVD se limita a solo el reactor es decir en la cámara de vacío con la caldera correspondiente y al sistema de entrada y mando de regulación de gases ,este sistema generalmente forma películas gruesas.

LPCVD , empezamos hablando que normalmente el proceso de la formación de capas sobre el sustrato se debe pensar en la difusión de la reacción sobre la intercapa del sustrato , es decir , la facilidad que tiene el gas de propagarse sobre esta capa que rodea el sustrato para así tener una mayor velocidad de deposición , es por esto que fue diseñada esta técnica , para una temperatura dada dentro del reactor el valor agregado de reducir la presión la velocidad de difusión aumenta bastante esto hace que la respuesta en la superficie del sustrato determina la cinética química es decir la rapidez de reacción en la formación de la película , al mismo tiempo genera una uniformidad , es decir, no deja que se generen estructuras amorfas.

La respuesta que se generan en la técnica de CVD, suelen ser de tipo homogénea es decir que la reacción del elemento se encuentre en su punto gaseoso o heterogéneo o que simplemente esté en conexión con el elemento al que se le requiere mejorar sus propiedades con base en un recubrimiento.

Las reacciones homogéneas son partículas muy pequeñas que van del orden de decenas o centenas de nanómetros y tan solo por gravedad son adheridas al sustrato, pero también en algunas partes del reactor hasta en la cámara de evacuación de gases, puesto que están en el ambiente del reactor y pueden ser arrastradas cuando se genere la evacuación de otras partículas.

Las heterogéneas se alojan en el sustrato y en las paredes del reactor.

Generalmente siempre se hallan las dos reacciones en el CVD así que lo que se hace es hacer que una predomine sobre la otra , en un ejemplo se requería crear una película con un espesor homogéneo , es decir , tiene que prevalecer la reacción heterogénea ya que se necesita reducir la colisión entre las partículas para así no generar estructuras amorfas , esto se hace disminuyendo la presión dentro del reactor y se ratificaba que hubiese un contacto directo entre el sustrato y el elemento que generará la película.

Por otro caso en algunas demandas de recubrimiento se necesita una capa que tenga la textura de un polvo en este caso se prevalece las reacciones homogéneas.

Ahora bien, las reacciones químicas tienen distintos métodos de activación para su proceso de deposición, se puede clasificar en 2 subramas, activándolo térmicamente, y por plasma que este método es muy interesante ya que se puede hacer por radiofrecuencia o microondas.

Al momento de activar un CVD térmicamente las reacciones tienen un valor agregado al trabajar con temperaturas que oscilan entre (400 - 1000° c) para conseguir las activaciones térmicas hay distintas maneras entre ellas podemos hablar de una resistencia local lo cual popularmente se halla con el nombre de

“reactor de pared fría” el cual se realiza por medio de un caldera en el interior del reactor o por un sistema de inducción lo cual debe haber un medio en el que se genere esta transferencia de calor, este método de pared fría requiere menos energía que la de pared caliente ya que tiene una demanda de calor que se obtiene de una fuente común como lo puede ser un caldera este método suele hacer porque tiende a una posición preferente en el sustrato que en otras superficies así mismo no se derrocha energía en recubrir superficies innecesarias dentro del proceso y pueden desencadenar en inconvenientes como que las paredes internas del reactor se recubren con películas de cualquier recubrimiento y en procesos futuros se desprendan y causen procesos no deseados.

En la técnica de pared caliente se usa un horno móvil que está en contacto con las paredes del reactor el cual en su interior lleva una barra de cuarzo la homogeneidad que se genera a ciertas temperaturas dadas por este método en gran parte de las paredes facilita la deposición sobre un gran número de sustratos en dado caso probetas.

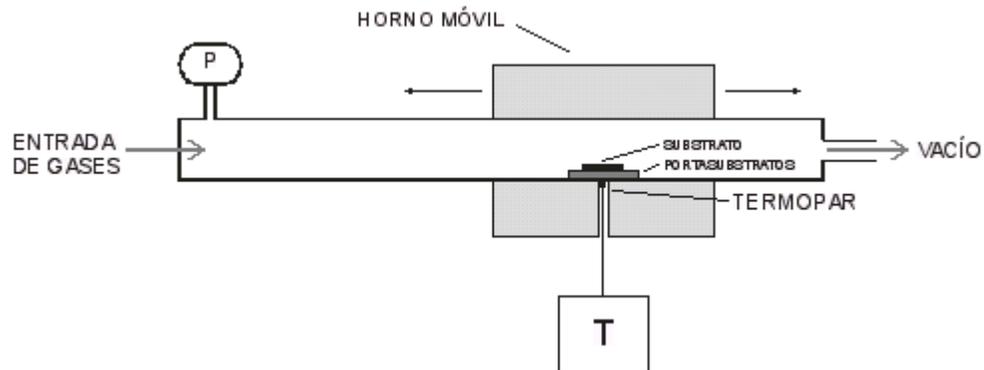


Figura 9, pared caliente tomada de : [https://www.icmm.csic.es/fis/espa/preparacion\\_ff.html](https://www.icmm.csic.es/fis/espa/preparacion_ff.html)

hay algunos sistemas de estos que se muestran en la anterior imagen que trabajan 1 a 100 torr se pueden obtener materiales en forma de polvo cerámico.

En el artículo “Tribological evaluation of thermally activated CVD diamond-like carbon (DLC) coatings” se realizó un estudio donde se depositaron recubrimientos de carbono tipo diamante mediante deposición de vapor químico activado térmicamente. La temperatura de deposición fue de 900 ° C y se utilizó yoduro de metileno (CH<sub>2</sub>I<sub>2</sub>) como precursor. La evaluación tribológica se realizó midiendo la rugosidad de la superficie junto con la dureza, micro abrasión y fricción. Además, la tensión residual del revestimiento se evaluó mediante un método de deflexión. El recubrimiento se analizó con análisis de reacción nuclear, microscopía electrónica de barrido y microscopía de fuerza atómica.

Se llegó a la conclusión que el revestimiento de DLC puede depositarse con un espesor uniforme sobre superficies con geometría compleja, es decir, agujeros y cavidades (siempre que la reacción este controlada por la superficie), además la baja tensión residual permite depositar revestimientos relativamente gruesos, también se obtuvo una alta resistencia al desgaste por abrasión ligeramente peor que el nitruro de titanio (TiN) depositado físicamente por vapor (PVD). [13]

Luego se tiene un CVD que se activa por un plasma ya sea por un plasma de tipo de radio frecuencia o asistido por plasma de microondas.

Se trata de una descarga de intensidad como bien dicho en forma de plasma en el interior de la cámara generando que haya demasiada energía obteniendo una mejor velocidad de reacción estas descargas se hacen con AC es por esto que la eficiencia del al momento de deposición es mucho mejor.

Pues bien , en un CVD asistido por plasma existen los de tipo de Radiofrecuencia los cuales son popularmente conocidos como “RF Plasma-assisted Chemical Vapor Deposition” (PACVD) en este proceso se trabajan con presiones muy bajas que oscilan entre 0,01-1 Torr y la temperatura suele ser menor a los 350°C , en este se denotan que dentro del reactor se hallan dos electrodos de aluminio paralelos a la aplicación de la descarga , en este nuevo sistema el electrodo inferior muy cerca donde se aloja el sustrato llega a alcanzar temperaturas hasta de 350°C lo cual nos da beneficios como depositar nitruro de silicio empleadas para crear mini películas de difusión en temas de microelectrónica o también para un aislamiento en diferentes niveles de metalización.

En la técnica de plasma asistido por microondas, “Microwave assisted Chemical Vapor Deposition” (MWCVD), da unos resultados de excitación al momento de la descarga de 2,45 Ghz dando así que se pueda disociar la molécula de hidrógeno lo cual nos abre grandes posibilidades.

En el artículo “Characterization of bias enhanced MWCVD diamond thin films” las películas de diamante depositadas por MWCVD (deposición química de vapor asistida por microondas) después de la nucleación mejorada por polarización se han caracterizado por espectroscopía Raman (RS), microscopía electrónica de barrido (SEM) y mediciones eléctricas. La relación diamante / grafito en las películas, medida por RS y verificada por mediciones eléctricas, depende de la concentración de metano durante la etapa de crecimiento y la temperatura en la etapa de polarización.

Cuanto mayor sea el contenido de diamante en las películas, mejores propiedades dieléctricas exhibirán. La conductividad de corriente directa (DC) de estas películas

es siempre menor que la medida en películas cultivadas en sustratos rayados. Por lo tanto, las películas de diamante con conductividades de corriente directa (DC) bajas, similares al diamante natural, podrían depositarse eligiendo las condiciones de nucleación de polarización adecuadas. Las mejores películas se obtienen para altas temperaturas de nucleación y bajo porcentaje de metano (0,125%). [14]

También se combinan algunas técnicas de deposición en este caso hallamos el MWCVD añadiendo campos magnéticos, la intensidad que se genera se dispone para que los electrones secundarios orbiten en las ondas del campo magnético a la misma frecuencia en que se produce la descarga, alcanzando así una condición de resonancia en la oscilación de los electrones, "electron cyclotron resonance" (ECR) lo cual se genera una gran densidad de plasma por su eficiencia al momento de la ionización.

Esta técnica de ECR trabaja a presiones de  $10^{-2}$  y  $10^{-3}$  mTorr estos equipos dan paso a aislar los sustratos de las descargas evitando daños de radiación, una buena práctica con esta técnica es polarizar los sustratos mediante potenciales negativos lo cual permite que los iones negativos los "pulverizan" con más fuerza lo que permite una mayor energía de los átomos que llegan al sustrato ya que así ayudan a ser difundidos más fácilmente con esta técnica no se hallan muchas demandas de temperatura así es mucho más fácil controlar las distintas variables como lo pueden ser potencia, corriente de la bobina entre otras y las condiciones dentro del reactor, la evacuación de los gases como presiones de trabajo entre otros.

En el artículo "Field emission studies of diamond-like grown by RFCVD" las películas de carbono amorfo hidrogenado (a-C:H) preparadas por deposición química en fase de vapor mejorada con plasma de radiofrecuencia (RFCVD) tengan usos prácticos en dispositivos electroópticos. La función de trabajo de electrones excepcionalmente bajo lo convierte en un material prometedor para su uso en dispositivos de emisión de campo. La CVD de radiofrecuencia (RF) produce radicales relacionados con el carbono, como grafito, carbono amorfo, embriones, películas de carbono y de tipo diamante (DLF) que generalmente se cultivan en el sustrato dependiendo de la temperatura del sustrato, potencia de RF y la relación de la mezcla  $CH_2 / H_2$ .

La estrategia para el crecimiento exitoso de DLF es la erosión de los enlaces  $sp$  o  $sp^2$  débiles, como el grafito y los grupos de carbono amorfo, por iones de hidrógeno [5] simultáneamente con el crecimiento de la película. En la ECV mejorada con plasma de RF, los iones de argón energético acelerados por el sesgo negativo juegan el mismo papel.

Por lo tanto, al aumentar la auto-polarización  $V_b$  inducida por el campo de RF, se producen iones de hidrógeno y argón más energéticos para aumentar la erosión. La RFCVD produce radicales relacionados con el carbono, como grafito, carbono amorfo, embriones, películas de carbono y de tipo diamante (DLF) que

generalmente se cultivan en el sustrato dependiendo de la temperatura del sustrato, potencia de radiofrecuencia y la relación de la mezcla  $CH_2 / H_2$ . La estrategia para el crecimiento exitoso de DLF es la erosión de los enlaces  $sp$  o  $sp^2$  débiles, como el grafito y los grupos de carbono amorfo, por iones de hidrógeno simultáneamente con el crecimiento de la película.

En la RFCVD, los iones de argón energético acelerados por el sesgo negativo juegan el mismo papel. Por lo tanto, al aumentar la auto polarización inducida por el campo de radiofrecuencia, se producen iones de hidrógeno y argón más energéticos para aumentar la erosión. Los autores demostraron que las películas tipo diamante reconocidas con gas hidrógeno y dopadas con boro depositadas sobre superficies de silicio de oro aumentan enormemente la eficiencia de emisión del campo. Además, si el DLF está recubierto en las puntas de los dispositivos de emisión de campo, la corriente de emisión se puede mejorar en gran medida. La función de larga duración, poco trabajo y las películas depositadas uniformemente por un sistema CVD de baja potencia pueden superar los inconvenientes. [15]

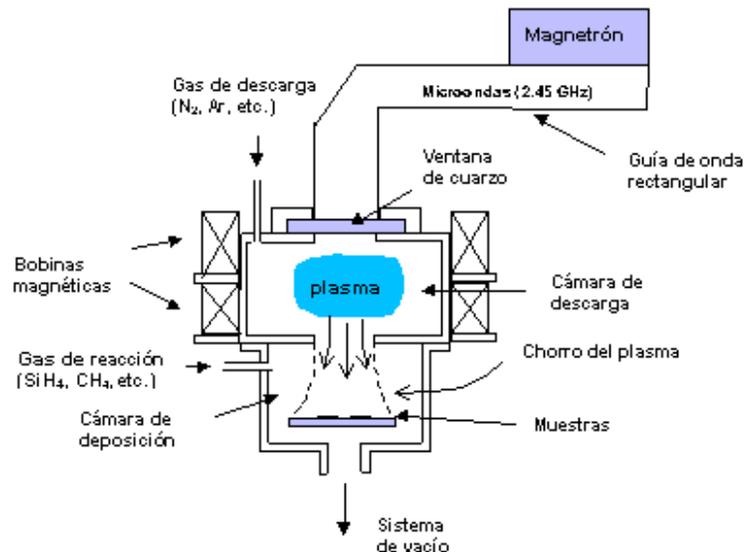


Figura 10, MWCVD tomada de : [https://www.icmm.csic.es/fis/espa/preparacion\\_ff.html](https://www.icmm.csic.es/fis/espa/preparacion_ff.html)

Las películas delgadas de DLC han tenido últimamente mucho campo de acción en los productos industriales y aplicaciones biomédicas debido a sus propiedades de alta dureza, baja adhesión y baja fricción, además de su excelente inercia química y biocompatibilidad [16], es decir, que poseen la capacidad de no degradar o destruir el ambiente en el cual coexisten, por esta razón son material usados en humanos. El DLC se clasifica en cuatro tipos, si posee carbono o no y si posee alto o bajo contenido de  $sp^3$ . Los tipos de DLC que contienen hidrógeno se clasifican en carbono tetraédrico amorfo hidrogenado ( $ta-C:H$ ) y carbono amorfo hidrogenado ( $aC:H$ ), las películas de  $aC:H$  se aplican en la industria y poco a poco han tenido una expansión notable en otros campos, por otro lado El DLC que no contiene

hidrógeno se clasifica como carbono tetraédrico amorfo con un alto contenido de  $sp^3$  (ta-C) y carbono amorfo con un bajo contenido de  $sp^3$  (aC), las películas de ta-C sin hidrógeno con propiedades cercanas a las del diamante poseen unas propiedades interesantes como lo son la resistencia al desgaste y al calor, dureza ultra alta y alta densidad, últimamente se han utilizado en aplicaciones relacionadas con la tribología, como en piezas de automóviles, pero sus aplicaciones van más allá y recientemente han generado más interés en la industria [17]. También se espera que los recubrimientos de DLC brinden protección a los sustratos, y se ha informado del efecto de la adición de silicio [18] y la resistencia a la corrosión de los recubrimientos de DLC en varias soluciones acuosas (NaCl, HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) [19] utilizando métodos de evaluación electroquímica.

Dos métodos muy importantes para trabajar con DLC son los láseres de femtosegundos (fs) y la estructura superficial periódica inducida por láser fino (LIPSS), ya que estos métodos son capaces de micro mecanizado de precisión con efectos térmicos extremadamente bajos en materiales difíciles de procesar como DLC [20]. Fs LIPSS se ha informado cada vez más como un método de modificación de la superficie para optimizar las propiedades de fricción, humectación, ópticas, biológicas y de reactividad de una superficie de muestra [21].

Ha habido un número creciente de publicaciones sobre la formación de LIPSS y la corrosión que provoca un deterioro en componentes de fundición, cuando los elementos constituyentes son lixiviados (proceso por el cual se extrae uno o varios solutos de un sólido) de forma selectiva o son convertidos en productos de corrosión, sin alteración del grafito (grafitización) de superficies DLC utilizando fs-láseres para mejorar las características de fricción [22].

Las mediciones de la curva de polarización para DLC irradiado indican que la densidad de la corriente de corrosión se redujo, a pesar del efecto de un área de superficie aumentada por la formación de LIPSS, y las curvas de polarización tendieron a acercarse a las de las placas placa de carbono vítreo (GC), que es un tipo de grafito nano cristalino (nc-G), para comparar. Por lo tanto, la capa superficial irradiada de DLC se modifica a grafito nano cristalino (nc-G), lo que da como resultado una excelente resistencia a la corrosión similar a la de carbono vítreo (GC). Los resultados se utilizaron para aclarar las condiciones de irradiación para producir LIPSS en una superficie de DLC mientras se mantenía el efecto de protección del sustrato del revestimiento de DLC [23].

Para depositar los recubrimientos DLC se han usado varias técnicas como lo son la deposición física de vapor (PVD), la deposición química de vapor (CVD) y los métodos de electrodeposición, estas distintas técnicas generan diferentes propiedades mecánicas y electroquímicas. Por medio de una técnica híbrida PVD / PECVD para depositar las películas de Ti-DLC, donde se usó PECVD para la deposición de películas DLC y PVD para el dopado de titanio (Ti). Este proceso híbrido facilita tanto las ventajas de la técnica PECVD, como una baja temperatura

de deposición y deposición uniforme y a gran escala, como las de la técnica PVD, en este caso diversas opciones de fuentes de dopaje a partir de blancos sólidos, lo que la convierte en una técnica prometedora para la producción industrial en masa de electrodos de película DLC dopados, generando una baja temperatura de deposición y deposición uniforme y a gran escala [24]. Se ha evidenciado que el dopado de elementos metálicos cambia la estructura del recubrimiento, como la rugosidad de la superficie y la resistencia al desgaste. También se ha informado que los dopantes metálicos dan como resultado la formación de carburos que cambian significativamente las propiedades mecánicas y electroquímicas del recubrimiento [25]. En cuanto a los elementos no metálicos, la incorporación del silicio al recubrimiento de DLC disminuye la tensión interna y mejora el comportamiento tribológico, es decir, la fricción, el desgaste y la lubricación [26]

Las propiedades estructurales y la morfología de la superficie de los recubrimientos se pueden realizar mediante la microscopía Raman y el análisis AFM. El recubrimiento DLC tiene una mejor resistencia a la corrosión en comparación con el recubrimiento N-DLC. Un recubrimiento DLC dopado con nitrógeno tenía una mayor rugosidad superficial y energía superficial en comparación con el recubrimiento DLC. La incorporación del nitrógeno al recubrimiento de DLC, su estructura se vuelve más grafitizada. [27]

Las películas DLC también se pueden depositar mediante una técnica llamada implantación y deposición de iones basada en plasma de tipo bipolar (PBII & D). En esta técnica el plasma de descarga luminiscente se forma cerca de la superficie del objetivo aplicando un voltaje de pulso positivo directamente al objetivo, y el plasma se implanta omnidireccionalmente en (o se deposita sobre) la superficie del objetivo mediante un voltaje de pulso alto negativo posterior. El tipo bipolar PBII & D proporciona una buena fuerza de adherencia entre la película y el objetivo, y también es muy útil para objetivos tridimensionales como componentes de computadoras y teléfonos móviles hechos de aleación de magnesio [28]. Los recubrimientos de carbono tipo diamante (DLC) ofrecen el mejor rendimiento de protección para la aleación de magnesio debido a su alta dureza y baja fricción, y su inercia química. En particular, los recubrimientos DLC incorporados en silicio (Si) muestran una fricción muy baja, una tensión interna reducida, buenas propiedades de adhesión y una dureza relativamente alta [29-31].

La incorporación de silicio (Si) en las películas DLC mejora la capacidad de protección contra la corrosión de la película, también mejora el rendimiento de protección contra la corrosión con el aumento de silicio (Si) sobre una aleación de magnesio. La capa de óxido aislante en la película de Si-DLC da como resultado altas propiedades anti corrosión, y una tensión interna muy baja, esto explica las razones de las altas utilidades anticorrosión del silicio (Si) en Películas DLC. El tratamiento de plasma de oxígeno en la película de magnesio AZ31 forma una capa gruesa de óxido de magnesio en la superficie y aumenta la resistividad eléctrica, lo que da como resultado un mejor rendimiento de corrosión de la película.

Se llega a la conclusión que el tratamiento con plasma de oxígeno (PBII & D) será un método de pretratamiento prospectivo antes del recubrimiento protector de DLC. [32]

Los recubrimientos de TiN y DLC podrían lograr una mayor resistencia a la polarización de la corrosión y un potencial de corrosión más estable en el entorno de SBF que el sustrato de acero inoxidable sin recubrimiento SS316L. El buen rendimiento de protección contra la corrosión del TiN puede deberse a la formación de una capa pasiva de Ti – O en la superficie del recubrimiento, que protege al recubrimiento de una mayor corrosión. Los recubrimientos de TiN y DLC también exhiben una excelente resistencia al desgaste y estabilidad química durante las pruebas de deslizamiento contra un biomaterial de polietileno de alta densidad (HDPE). Las propiedades tribológicas y de corrosión de los recubrimientos de TiN y DLC se investigan en un entorno de fluido corporal simulado (SBF). [33]

Se espera que los recubrimientos cerámicos duros PVD y CVD sean los biomateriales emergentes para dispositivos médicos que soportan carga debido a su excelente desempeño de protección contra la corrosión y el desgaste. Los recubrimientos cerámicos preparados por el método de arco catódico, pulverización catódica de magnetrones reactivos, etc. han sido estudiados en su resistencia a la corrosión, características biocompatibles y propiedades mecánicas. Hasta el momento, los recubrimientos de TiN y carbono similar al diamante (DLC) todavía se consideran los recubrimientos más prometedores utilizados para biomateriales de carga y se han utilizado en prótesis ortopédicas, válvulas cardíacas y prótesis dentales [34-37].

La corrosión es el deterioro de un material que trae daños y consecuencias al proceso industrial y desarrollo económico en la interacción del medio como el agua, aire, sal, ácido, solución, álcali, etc. [38]

Las películas DLC de pulverización catódica con magnetrón tienen aplicaciones industriales muy extensas debido a su inercia química positiva, excelente resistencia al desgaste, excelente propiedad tribológica y prometedor rendimiento de resistencia a la corrosión [39]. No obstante estudios demuestran que la capacidad de protección contra la corrosión de la película DLC es limitada debido a que posee una alta tensión interna y una baja fuerza adhesiva con los sustratos, estas propiedades generan que se desprege y agriete ligeramente, por tal manera el medio corrosivo penetra la superficie / interfaz del sustrato por medio de diferentes canales de difusión y se pierden las propiedades anticorrosión y la película se deteriora.

Los investigadores prefieren realizar el análisis en metales ya que estos forman carburos nano cristalinos con carbono que influyen en la microestructura y las propiedades, en un estudio se concluyó que con el dopaje de titanio la película DLC mejoró significativamente sus propiedades de adhesión; el titanio es un candidato

prometedor para la protección contra la corrosión del sustrato debido a su alta conductividad y su extraordinaria resistencia mecánica, la incorporación de titanio en la película de DLC podría proporcionar la capacidad de resistencia a la corrosión y mejorar el módulo de impedancia de frecuencia más baja debido al efecto de barrera física y la capa intermedia de pasivación.[40].

Por lo tanto, dos o más estrategias de co-dopaje de metales pueden superar el problema de la alta tensión interna y la escasa fuerza adhesiva, y manifiesta su potencial para mejorar las propiedades combinadas al máximo, por ejemplo, una película Cr-DLC manifestó un rendimiento de fuerza de adhesión con una cantidad de cromo relativamente baja (2,34%). otro ejemplo de dopaje es una película de Cu-DLC sobre acero dulce que eliminó con éxito la tensión interna y fortaleció drásticamente la capacidad de resistencia a la corrosión. Las películas DLC co-dopadas con Ti / Al a través de un sistema de haz de iones híbrido y con la introducción simultánea de Ti y Al alivió la tensión residual de manera efectiva y también poseía un rendimiento mecánico superior. Además, la película DLC co-dopada de Cu / Cr muestra propiedades mecánicas superiores y un esfuerzo de compresión residual más bajo que la película mono dopada de Cu / Cr, en conclusión, el dopaje múltiplemente tiene la ventaja de se pueden obtener las propiedades combinadas deseables a comparación del dopaje convencional.

Mediante el método de pulverización catódica con magnetron se caracterizaron el rendimiento electroquímico, la morfología y la microestructura tanto cuantitativa como cualitativamente; en comparación con (Cu, Ce) -DLC, la película (Cu, Ce) / Ti-DLC posee una estructura más gruesa y densa. El Ti dopado es capaz de frenar la cristalización de la fase de cobre y formar cristales de TiC que se disuelven dentro del amorfo a base de carbono. [41]

El acero inoxidable es un material muy usado en el sector alimenticio en la etapa de procesado, debido a sus propiedades de bajo pH, altas temperaturas de procesamiento y alto contenido de sal. Pero no todo puede ser perfecto, este material presenta fallas si la superficie está expuesta a influencias externas, como lo es el desgaste erosivo causado por pequeñas partículas abrasivas. Este desgaste erosivo que actúa con la corrosión tiene el nombre de erosión-corrosión, se conoce que este efecto degrada los materiales de manera mucho más rápida que otros efectos corrosivos debido a un efecto sinérgico entre el desgaste y la corrosión [42]. Las mejores opciones para mejorar la superficie del material son los recubrimientos DLC y el endurecimiento de la superficie a bajas temperaturas, ya que las películas de DLC son químicamente inertes y muestran una alta resistencia al desgaste tanto en el medio ambiente como en el medio acuoso.

Los recubrimientos DLC se pueden producir mediante técnicas PVD con un objetivo de pulverización catódica de grafito. Las propiedades físicas de los recubrimientos DLC pueden ser similares a las del diamante, pero su semejanza depende en gran medida de la estructura y composición del recubrimiento DLC. Los tipos de enlaces

en DLC se pueden describir como una mezcla de C – C sp<sup>3</sup> (tipo diamante), C – C sp<sup>2</sup> (tipo grafito) y C – C sp<sup>1</sup> (el enlace hibridado). Las propiedades de dureza y desgaste dependen especialmente del contenido de enlaces sp<sup>3</sup> y del contenido de hidrógeno en el recubrimiento DLC. Los recubrimientos DLC hidrogenados con una mezcla de sp<sup>2</sup> y sp<sup>3</sup> se denominan a-C: H (carbono amorfo hidrogenado). Si el contenido de sp<sup>3</sup> aumenta y el contenido de hidrógeno disminuye, es posible obtener la estructura ta-C: H (carbono amorfo tetraédrico hidrogenado) o la estructura ta-C (carbono amorfo tetraédrico); el carbono amorfo tetraédrico es del tipo DLC con un contenido máximo de sp<sup>3</sup> y un mínimo de hidrógeno, lo que lo hace más duro que el carbono amorfo hidrogenado. Este tipo de DLC se puede cultivar con técnicas de deposición que involucran iones de alta energía, como la evaporación por arco catódico filtrado. El tipo de DLC de carbono amorfo hidrogenado (a-C: H) tiene un contenido de hidrógeno de 20 a 40%. Estos tipos de recubrimiento suelen depositarse mediante pulverización catódica reactiva a voltajes de polarización de sustrato moderados. Sin embargo, las películas de DLC tienen sólo unos pocos micrómetros de espesor y cuando se recubren sobre un sustrato blando, como acero inoxidable, la capacidad de carga es baja; el sustrato se deforma plásticamente y la película DLC puede desprenderse en forma de escamas [43-45]

La nitruración gaseosa a baja temperatura es un proceso favorable en la industria para producir una capa inferior para recubrimientos duros delgados utilizados en sistemas tribocorrosivos. Este proceso de nitruración a baja temperatura en acero inoxidable conduce a la formación de una zona superficial (subcapa) de la denominada austenita expandida, es decir, mediante la disolución de grandes cantidades de nitrógeno en una solución sólida, esta subcapa austenítica mencionada anteriormente aumenta la capacidad de carga del acero inoxidable (y el sistema de capas) y evita la formación de escamas de la capa superior de DLC dura y delgada. Con un acero inoxidable específico y con diferentes propiedades (acero inoxidable nitrurado a baja temperatura AISI 316 y en acero inoxidable nitrurado a baja temperatura AISI 316 con una capa superior de DLC) se llegó a la conclusión que la combinación de DLC y nitruración a baja temperatura reduce drásticamente la cantidad de erosión-corrosión del acero inoxidable bajo el impacto de partículas en un medio corrosivo. [46]

Fretting es un proceso de desgaste que afecta principalmente el campo de la aeronáutica, este fenómeno es inducido primordialmente por vibraciones y puede ocurrir en diferentes partes como pernos, ejes y cojinetes donde diferentes componentes metálicos están en contacto y experimentan un movimiento superficial repetido. La característica del desgaste de los componentes de acero es la formación de óxido de hierro negro Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> que se transforma en rojo / marrón - Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en presencia de oxígeno y vapor de agua. Por lo tanto, la humedad del aire es un factor a tener en cuenta para el desgaste de metales y cerámicas. [47]

El lubricante sólido más común en tribología industrial es el disulfuro de molibdeno, la eficacia de este lubricante depende de muchos parámetros y su aplicación suele estar limitada debido a sus altos costos. En el caso de los recubrimientos cerámicos, donde el material de recubrimiento es más duro que el sustrato, se mejora la resistencia al desgaste frente al desgaste por fricción.

Los recubrimientos a base de Si depositados por PACVD han mostrado buenas propiedades anticorrosión. Las películas son generalmente densas y amorfas, y sus propiedades de aislamiento eléctrico explican su excelente desempeño en términos de protección contra la corrosión, sin embargo, los recubrimientos DLC son más utilizados por sus propiedades lubricantes internas que por su desempeño anticorrosivo [48-50]. Cuando dos elementos metálicos están en contacto entre sí, son sometidos a movimientos oscilatorios de baja amplitud generando daños corrosivos debido a la fricción generada, este caso de corrosión es un factor muy importante en la durabilidad de las juntas aeronáuticas. La capacidad de protección contra la corrosión de los recubrimientos de SiC y SiCN está relacionada con sus propiedades de resistencia y su naturaleza química.

La incorporación de nitrógeno en un revestimiento de SiC tiene una influencia beneficiosa, con un aumento de la resistencia a la polarización medida en la prueba de inmersión prolongada. El carácter de nitruro de silicio de los enlaces Si aumenta las propiedades aislantes, induciendo un acoplamiento galvánico muy limitado y una alta protección contra la corrosión del sustrato de acero. Lamentablemente, el comportamiento de fricción en medios acuosos es malo y conduce a una degradación completa de la pieza revestida. Al depositar una capa superior de DLC adicional se aprovecha su alta resistencia al desgaste asociada a su muy bajo coeficiente de fricción. La capa de DLC mantiene la protección anticorrosiva del sustrato inherente a la capa intermedia de SiCN. El comportamiento tribológico del DLC permite disminuir el impacto del mecanismo de adherencia, desgaste y soldadura en frío. Estas conclusiones fueron realizadas mediante un análisis de los comportamientos de corrosión, tribología y tribocorrosión de los recubrimientos dúplex de SiC (N) / DLC depositados sobre acero por PACVD. [51]

La microestructura de películas de carbono amorfo muy delgadas puede dilatar las propiedades de la masa, esto tendría consecuencias en las propiedades físicas del material (eléctricas, electroquímicas, ópticas y mecánicas). Los dispositivos magnéticos están sujetos al ataque químico de alta humedad y contaminantes agresivos como Cl<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S. Estos contaminantes son las bases para ataques electroquímicos y disolución de metales. La función principal de tener capas de carbón en la película es proporcionar protección contra el desgaste y la corrosión. Para tener una protección perdurable se deben tener en cuenta las siguientes propiedades: inercia química, alta resistividad eléctrica junto con demandas microestructurales como alta densidad, superficie lisa sin microporosidades y vías de difusión, estequiometría homogénea, capas libres de tensión y una buena adhesión entre el revestimiento y el material del sustrato. Además del espesor de la película, hay otras propiedades como la rugosidad del sustrato y las condiciones de

deposición pueden influir en la cobertura de la película. Para proporcionar una película ultrafina continua y homogénea, se tienen en cuenta las técnicas de deposición por haz de energía dirigida, como la CVD por haz de iones, la deposición química en fase de vapor mejorada con plasma (PECVD) y el arco de vacío catódico filtrado (FCVA). Estas técnicas poseen una ventaja principal que es su capacidad para producir especies carbónicas con energías de alto impacto [52].

El aumento de la rugosidad de la superficie permite la retención capilar de vapor de agua en un ambiente húmedo y acelera la corrosión. Las técnicas más ampliamente utilizadas para la caracterización de la confiabilidad ambiental de los dispositivos magnéticos desnudos y revestidos son las pruebas aceleradas de humedad a alta temperatura y los estudios de polarización electroquímica de corriente continua (DC), estos métodos proporcionan datos relevantes sobre los procesos corrosivos que ocurren en la interfaz electroquímica.

Los métodos de corriente alternan (AC) como la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) ofrecen potencialmente más información, especialmente con respecto al rendimiento de recubrimientos con pequeños defectos en sustratos activos. Se pueden extraer numerosas métricas de los espectros de corriente (por ejemplo, frecuencias de punto de ruptura, mínimos de ángulo de fase, grabado de magnitud de baja frecuencia) y se pueden utilizar para cuantificar la integridad del recubrimiento y el rendimiento de corrosión a largo plazo. La espectroscopia de impedancia se basa en aplicar una pequeña modulación de potencial sinusoidal al sistema de electrodos y monitorear la amplitud y el desplazamiento de fase de la respuesta de corriente en un rango de frecuencias. Esta técnica se ha aplicado con éxito a la evaluación del carácter protector del polímero sobre metales, así como de dieléctricos como el óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) sobre acero. Aunque estos estudios electroquímicos de corriente alternan (AC) sobre revestimientos de carbono ultra fino son muy limitados [53-56]

Para analizar el comportamiento de la corrosión de recubrimientos DLC dopados con PECVD Si sobre sustrato  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  en solución 2M de HCl se usaron las técnicas de impedancia electroquímica y polarización potencio dinámica.

Con unas características especiales que son la incorporación de 3,6 de silicio al DLC y con un espesor de película de 2 a 100 nm. Los espectros de impedancia electroquímica son analizados mediante un circuito equivalente que incorporó dos constantes de tiempo que representan el revestimiento de Si-DLC y la reacción de corrosión que se produce en la interfaz  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$  del electrolito.

Las películas de 2 a 10 nm, son películas ultrafinas que presentan propiedades de barrera al sustrato, ya que se evidencian aumentos de un orden de magnitud y se producen beneficios como curvas de polarización anódica más pronunciadas evidenciadas por aumentos de un orden de magnitud en relación con el sustrato en la resistencia de transferencia de carga, que es una medida de la velocidad de las

reacciones electroquímicas que ocurren en el electrolito / sustrato, las películas más delgadas presentan una superficie muy picada, estas picaduras se producen en los sitios de TiC. Las películas un poco más gruesas (con un grosor superior a 20 nm) permanecen intactas [57]

Ya habiendo abarcado los métodos de deposición hablaremos un poco de las Técnicas de caracterización de superficies y películas delgadas ya que hay algunos métodos para determinar el cómo se comporta el recubrimiento después de haberse aplicado lo cual nos lleva a estas técnicas de análisis, estas son las siguientes las abordaremos de forma muy puntual enfocándonos un poco en una la cual nos determinaría muy bien el análisis sobre los cojinetes de bancada.

Una de estas técnicas se basa en la magnitud de radiaciones o moléculas que refleja el sustrato cuando es irradiado ya sea fotones, partículas pesadas o átomos. Estas técnicas como lo son x-ray photoelectron spectroscopy (XPS) y Ultraviolet-ray photoelectron spectroscopy (UPS) que toman lecturas a partir de analizar la energía de los electrones cuando se le irradia con rayos ultravioletas con un solo tipo de energía (monoenergéticos) o con rayos x, es decir, se pueden analizar algunas niveles externos.

La otra es una técnica de análisis llamada Microscopio de efecto túnel (STM) integrado en un microscopio electrónico de barrido (SEM). Se basa en un análisis de tipo morfológico, es decir, estructural solamente alcanzado por niveles microscópicos.

La microscopía de fuerzas atómicas también es una de las técnicas de análisis de recubrimientos en base DLC dando muestras conductoras como de aislantes sin tener que hacer una preparación para el desarrollo de la misma, normalmente a este sistema se le adapta un microscopio óptico el cual permite situar la punta en una zona de la muestra venciendo así algunas restricciones como lo era efectuar barridos muy grandes de las superficies normalmente se utilizan puntas de nitruro de silicio.

También se usan técnicas como Microscopio de efecto túnel (STM) nos arroja esquemas monocristalinos de la estructura atómica de las películas lo cual nos arroja información del orden atómico en la última capa de superficies limpias, difracción cuantitativa de electrones lentos (LEED I-V) integradas en un equipo de Ultra alto Vacío (UHV) información sobre los haces difractados al momento de incidir cierta energía, al mezclar estas dos técnicas hallamos tanto la estructura atómica superficial con su espesor en la monocapa y así mismo relacionarla con algunas propiedades electrónicas

En el análisis por Espectroscopía de Infrarrojo (IR) se registran en dispositivos que toman datos ya sea por transmitancia o absorbancia, se pueden tomar probetas sólidas de distintas geometrías, tanto en una película delgada como en polvo

cerámico ya antes mencionado en el caso de la capa con textura de polvo se requiere que en el ensayo se tenga una pastilla con el elemento a analizar y bromuro potásico en polvo.

En la técnica de Perfilometría lo que se hace es hacer un barrido sobre la superficie del sustrato con una punta de diamante con una fuerza ya definida para cada recubrimiento y sustrato para así tomar datos de variaciones de esta manera se pueden determinar cambios de espesor.

También podemos analizar los sustratos ya recubiertos por nanoindentación que se basa en estudiar las propiedades mecánicas del recubrimiento con respecto a la huella que deja la incisión de una punta nanométrica de diamante

Acá en técnicas electroquímicas se evalúan comportamientos de corrosión por técnicas electroquímicas de corrientes tanto AC Y DC , explicaremos un poco de una de las variantes de esta técnica que es la EIS , Análisis por de medio de espectroscopia de impedancia electroquímica por sus siglas en inglés (EIS) la cual, tomándolo desde su nombre es un método electroquímico ( reacciones químicas que se dan en un proceso de un electrodo y un conductor iónico se da generalmente en disoluciones pero también se puede hallar en algunos sólidos ) , este método se hace con una señal de corriente alterna que es aplicada al electrodo en este caso el acero inoxidable 304.

Estos espectros de impedancia son aislados con circuitos eléctricos que son compuestos con inductancias , capacitancias , resistencias entre otros, se hacen arreglos especiales que nos reflejan y nos den a entender los espectros de impedancia medidos , comúnmente a este método lo llaman “circuitos eléctricos equivalentes”

La impedancia la entendemos como la resistencia que está en un proceso con corriente alterna.

Este método es usado porqué

- Es un método para dar características a los cambios de ciertas superficies
- Cómo fines de aplicaciones, es decir, cuando queremos que una superficie tenga ciertas características para ciertas demandas.
- Para procesos complejos no lineales.

Es un método que abarca en su totalidad el concepto de la ley de Faraday , al aplicar un determinado potencial a un sistema electroquímico es cuando se halla la impedancia , y al entender los distintos resultados de impedancias entendemos los procesos químicos que están subyacentes dentro del sistema , en este proceso se leen procesos no lineales lo que es un muy buen método para nuestro proyecto ,

como se explicó anteriormente al hacer distintos arreglos con lo componentes se arroja lo que se conoce como “diagrama de Argand” que es donde podemos encontrar las distintas secciones de un proceso asistido por EIS

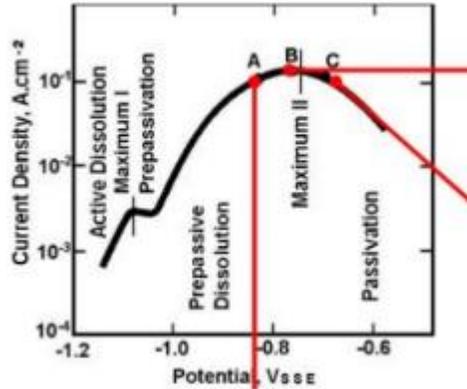


Figura 11 EIS tomada de [https://www.ilab.org/conferences/tfsrf/Thursday/Th2\\_1-EIS%20intro%20Reece.pdf](https://www.ilab.org/conferences/tfsrf/Thursday/Th2_1-EIS%20intro%20Reece.pdf)

En este esquema que fue tomada de corrosión anódica del hierro en ácido sulfúrico, en el eje Y esta la escala de densidad Actual, en el eje X se encuentra el potencial suministrado, para entender mejor vemos que hay una descomposición de la curva que en su etapa prematura se halla la disolución activa máxima, después de esto sufre una pre pasivación siendo elevada así la curva no lineal hasta que llega a un punto máximo que después se pasiva y la curva ya empieza a descender conforme suministramos más potencial la densidad disminuye.

En el concepto teórico la impedancia la podemos definir como la siguiente ecuación:

$E: IZ$  Ecuación 1

Usando la ley de ohm pero en este caso debemos tener en cuenta la amplitud de onda dentro del sistema de corriente alterna, es decir, habrá una tensión como intensidad oscilante, podemos desarrollar dos ecuaciones independientes una que se desarrolle para tensión y la otra para intensidad así,

$$E(t): lEl \sin (wt) \text{ Para tensión, Ecuación 2}$$

$$I(t): lIl \sin (wt + \theta) \text{ Para intensidad, Ecuación 3}$$

Entonces de la ecuación 1 podemos hallar la impedancia tomándola así

De ecuación 1:  $Z: E/I$

entonces se puede reescribir así:

$$Z = \frac{E(t)}{I(t)} = \frac{lEl \sin(\omega t)}{Il \sin(\omega t + \theta)} = |Z| \frac{\sin(\omega t)}{\sin(\omega t + \theta)}$$

Una toma de datos de impedancia para solo una frecuencia es un solo punto en el gráfico de Argand explicado anteriormente por lo tanto un espectro de impedancia es una serie de toma de datos donde cada punto es una frecuencia distinta arrojada en esta gráfica no lineal. <sup>6</sup>

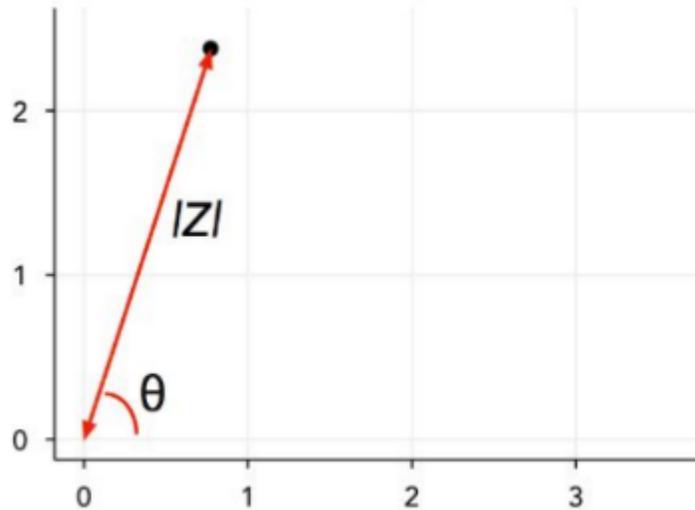


Figura 12: Imagen tomada de <http://lacey.se/science/eis/eis-principles/> ejemplo de toma de datos a una frecuencia específica.

En las gráficas de Argand son muy útiles para este ensayo de Espectroscopia de impedancia electroquímica, sin embargo, tiene una carencia que no nos muestra detalles sobre el valor de cada frecuencia. Es por eso, para profundizar más se usa el gráfico de Bode. <sup>7</sup>

Ahora bien, no podemos pasar por alto unos de los dispositivos más importantes en los métodos de obtención de recubrimientos en base DLC el cual serían las bombas que generan el vacío que se encuentra en las cámaras o reactores a continuación daremos un repaso puntual de las bombas utilizadas y algunos arreglos de ellas para cumplir ciertas demandas de presión de trabajo que necesitaremos en los recubrimientos en base DLC.

Cuando se habla de vacío su definición se basa en que toda presión que esté debajo de la presión atmosférica así pues hallamos algunos rangos de vacío este tema abarca innumerables demandas de trabajo desde empaquetamiento de comida al vacío, sistemas de soldadura por haz de electrones, sistema de detección de fugas de helio y por supuesto el generar vacío para generación de películas en base DLC entre otras muchas aplicaciones.

<i>Rango de vacío</i>	<i>Presión (mbar)</i>	<i>Densidad de moléculas/cm<sup>3</sup></i>
<i>Vacío grueso</i>	1013 - 1	10 <sup>19</sup> - 10 <sup>16</sup>
<i>Vacío medio</i>	1 - 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>16</sup> - 10 <sup>13</sup>
<i>Alto vacío</i>	10 <sup>-3</sup> - 10 <sup>-7</sup>	10 <sup>13</sup> - 10 <sup>9</sup>
<i>Ultra alto vacío</i>	< 10 <sup>-7</sup>	< 10 <sup>9</sup>

Tabla 5 tomada de <https://studylib.es/doc/8951767/curso-de-vacio-tecnovac>

Por lo tanto tienen unidades en la que se mide el vacío, que anteriormente nombramos acá denotaremos como se puede llegar a esas presiones de trabajo

	Pa-N/m <sup>2</sup>	bar	<i>mbar</i>	Torr mm Hg	Micron μm.Torr	atm	Psi lbf/inch <sup>2</sup>
Pa	1	1.10 <sup>-5</sup>	<i>1.10<sup>-5</sup></i>	7.5 10 <sup>-3</sup>	7.5	9.87 10 <sup>-6</sup>	1.45 10 <sup>-4</sup>
bar	1 10 <sup>5</sup>	1	<i>1 10<sup>5</sup></i>	750	7.5 10 <sup>5</sup>	0.987	14.5
<i>mbar</i>	<i>100</i>	<i>1 10<sup>-2</sup></i>	<i>1</i>	<i>0.75</i>	<i>750</i>	<i>9.87 10<sup>-2</sup></i>	<i>1.45 10<sup>-2</sup></i>
Torr	1.33 10 <sup>2</sup>	1.33 10 <sup>-5</sup>	<i>1.33</i>	1	1000	1.32 10 <sup>-3</sup>	1.93 10 <sup>-2</sup>
Micron	0.133	1.33 10 <sup>-6</sup>	<i>1.33 10<sup>-6</sup></i>	1 10 <sup>-3</sup>	1	1.32 10 <sup>-6</sup>	1.93 10 <sup>-5</sup>
Atm	1.01 10 <sup>5</sup>	1013	<i>1013</i>	760	7.6 10 <sup>5</sup>	1	14.7
Psi	6.89 10 <sup>3</sup>	6.89 10 <sup>-2</sup>	<i>68.9</i>	51.71	5.17 10 <sup>4</sup>	6.8 10 <sup>-2</sup>	1

Tabla 6 tomada de <https://studylib.es/doc/8951767/curso-de-vacio-tecnovac>

Serán explicadas según su rango de trabajo:

Bombas de diafragma es un bomba de desplazamientos positivo en la cual se varía el volumen de la cámara aumentando y disminuyendo así por donde pasa el fluido de trabajo por medio de unas membranas (paredes elásticas) así mismo al final de estas cámaras se hallan unas bolas de elastómeros que actúan como válvula de retención haciendo que el trabajo este de mayor a menor presión. Se halla en un rango de trabajo llamado vacío grueso, estas bombas tienen una gran ventaja es que son totalmente secas lo cual da paso a un arreglo con una bomba turbomolecular-drag sus desventajas es que no generan un gran vacío y tienen una pequeña capacidad de bombeo.

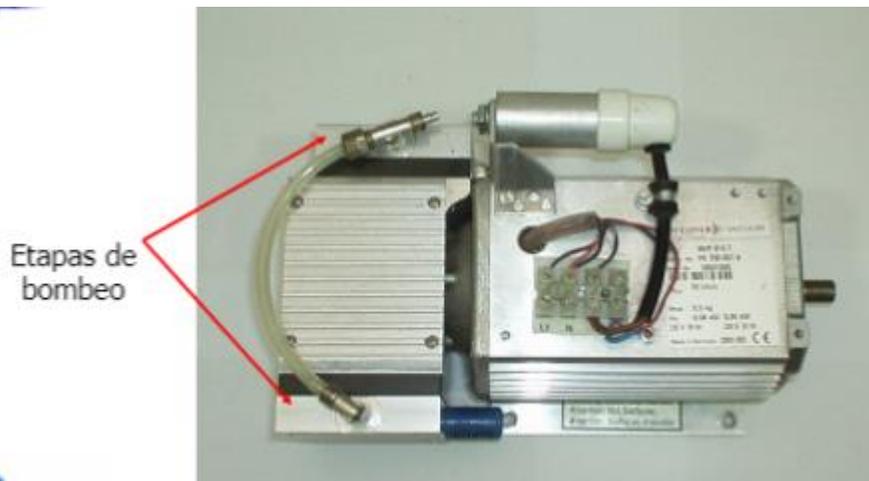


Figura 13 bomba de membrana tomada de : <https://studylib.es/doc/8951767/curso-de-vacio-tecnovac>

### Bombas rotativas:

Estas bombas se hallan en dos presentaciones de etapa simple y doble etapa se diferencia es una vez ejecutado el método de funcionamiento se vuelve a realizar para generar más vacío, de etapa simple alcanza vacíos de  $5 \cdot 10^{-2}$  mbar, de etapa doble alcanza a  $5 \cdot 10^{-3}$  mbar.

Su tipo de funcionamiento es consta de un ingreso de un diámetro determinado por donde pasa el fluido el cual entra a una cámara ( estator ) , con un rotor que tiene unas paletas en forma de hélice que se encuentran verticalmente a la entrada del fluido a este proceso se le llama aspiración , deja de ingresar fluido el rotor hace que las paletas encierren el fluido dentro de un cambio de volumen a este proceso se le llama aislamiento seguidamente lo agrupa volviendo a poner las hélices e vertical sin que la cavidad de salida esté abierta esto hace un proceso de compresión y seguidamente el rotor gira y la válvula se abre terminando con el proceso de vacío cabe resaltar que el diámetro de la salida del fluido es menor que la de entrada.

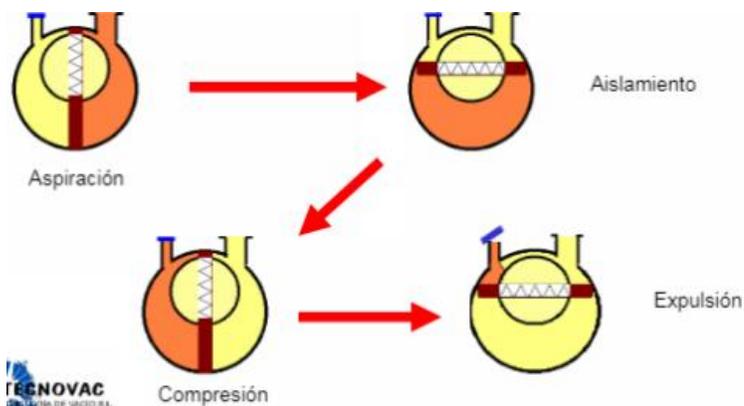


Figura 14 Bomba rotativa tomada de: <https://studylib.es/doc/8951767/curso-de-vacio-tecnovac>

De etapa doble trabaja de forma que al momento de aspiración de uno el otro esta en el estado de expulsión así trabajan sincrónicamente.

Tiene grandes ventajas como el alto índice de compresión  $10^6$ , se puede trabajar desde la presión atmosférica es decir no necesita una bomba anterior no tiene muchas demandas de mantenimiento, pero tiene grandes desventajas al momento de contaminar el proceso ya que arroja lubricante al proceso dando grandes problemas como lo puede ser el recubrimiento en base DLC.

Bombas difusoras:

Cuando ya tenemos presiones menores a 0,1 mbar con las bombas primarias se conecta un resistencia que hace que el fluido se caliente tanto que llegue a su punto de ebullición aumentando así su presión unos 3 mbar el vapor generado sube a gran velocidad a través de las toberas el gas llega hasta las paredes donde se refrigera por sus paredes y vuelve a su condensación volviendo así a la primera fase del proceso al hacer esto el chorro de vapor atrapa las moléculas y las arrastra en etapas para volver a hacer el proceso con la bomba primaria, si la presión de trabajo es mayor a 0,1 - 0,5 las moléculas de gas se retro difunden y la bomba difusora no es capaz de separarlas por lo tanto deja de ser efectiva, para evitar esto se suele colocar una cabeza más refrigerada para que así se retienen gran cantidad de vapores pero tiene una desventaja que se pierde una eficiencia grande de bombeo.

Tiene unas grandes velocidades de bombeo y es capaz de desplazar bastante cantidad de gas como las anteriores tiene una gran contaminación y es compleja por su cantidad de accesorios.

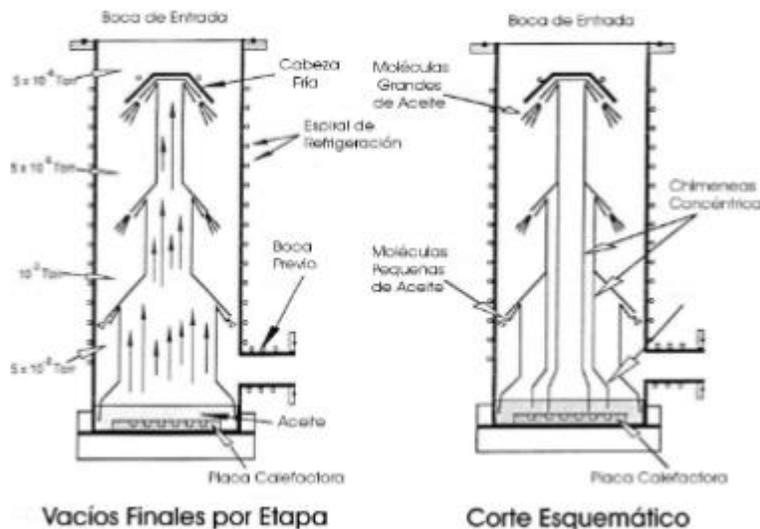


Figura 15 bomba difusora tomada de : <https://studylib.es/doc/8951767/curso-de-vacio-tecnovac>

## Bombas turbos moleculares

Estas bombas se basan en una superficie móvil que las moléculas adquieren al chocar con ella es decir toman esa gran velocidad y dirección tiene unos álabes en movimiento (rotor) y otro estacionario (estator), cada canal rotor y estator hace una etapa de bombeo las mayores etapas tienen como función succionar el mayor número de moléculas las etapas menores tienen la función de comprimir las moléculas hasta la descarga, la gran ventaja de estas bombas es que permiten ser usadas como bomba primaria las de membrana explicada anteriormente logrando eficiencias similares a las de bombas rotativas, estas bombas son muy amables con los recubrimientos ya que tienen un vacío limpio, es decir, sin aceite un fácil manejo sin válvulas tienen una eficiencia de bombeo en un tiempo muy corto estas bombas son super delicadas por lo cual es sensible a grandes cantidades de gas y golpes.

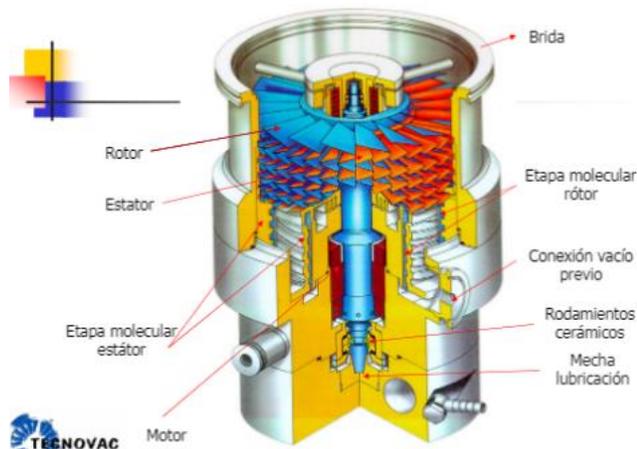


Figura 16 Bomba turbo molecular tomada de : <https://studylib.es/doc/8951767/curso-de-vacio-tecnovac>

Ahora bien, al haber demarcado estas bombas se pueden hacer arreglos entre ellas antes mencionados para alcanzar ciertas condiciones de trabajo a la que son hechos ciertos artículos acá mismos mencionados en la siguiente tabla se muestra según TECNOVAC como pueden ser lo arreglos para llegar a presiones de trabajo demasiado bajas:

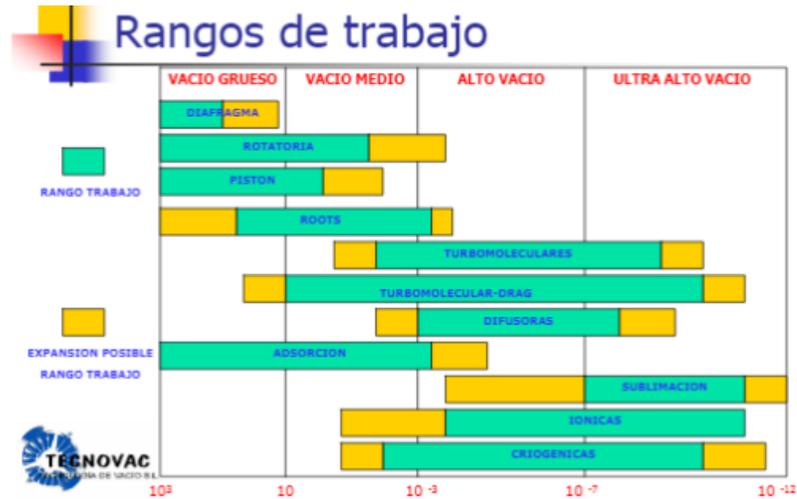


Figura 17 Rangos de trabajo tomada de: <https://studylib.es/doc/8951767/curso-de-vacio-tecnovac>

## 8.4 ETAPA 4

### IMPORTANCIA DE LA INFLUENCIA DEL PROCESO

En el **calentamiento mediante resistencias** explicado anteriormente podemos denotar que resulta muy apropiado para una deposición de metales y algunas aleaciones con un bajo punto de fusión como lo pueden ser el aluminio (Al), Plata (Ag), Oro (Au), óxido de silicio entre otros.

Mediante el **calentamiento por haz de electrones** obtenemos una focalización del haz de electrones esto permite un control de la velocidad de evaporación desde valores muy bajos hasta muy altos por lo tanto la posibilidad de depositar metales o aleaciones de alto punto de fusión como lo son Wolframio (W), Tántalo (Ta), Carbono (C) entre otros.

En el **“Sputtering”** nos arroja grandes ventajas en las multicapas y capas compuestas por nitruros metálicos, como lo pueden ser Titanio (Ti), Aluminio (Al), Zr (Circonio), con demandas de obtener un recubrimiento duro.

En la técnica de **deposición asistida mediante haces de iones (IBAD)** es utilizada para depositar capas de Titanio y nitruro de Titanio, así como de carbono y compuestos ternarios dentro del tema de carbono-boro-nitrógeno, en aplicaciones cuando el recubrimiento tiene demandas de dureza como lo puede ser el cojinete de bancada.

El nombre de recubrimiento DLC “carbono simil diamante” hace referencia a revestimientos finos logrados por las técnicas mencionadas anteriormente y con un sin fin de aplicaciones que van desde de la microelectrónica hasta la industria metal mecánica. El diamante no es estable en condiciones normales, pero a partir de átomos de carbono procedentes de un gas pueden ser depositados directamente sobre muchos materiales que ejercen el papel de sustrato y de esta manera permanecer estable, esto se hace para mejorar las condiciones del diamante de forma adecuada.

Las películas DLC se solo algunos micrones poseen unas propiedades inigualables como lo son: inercia química, bajo coeficiente de fricción (muy parecido al teflón) dureza extrema, alta conductividad térmica, alta resistividad eléctrica, baja absorción en el infrarrojo, alto coeficiente de ruptura dieléctrica. La mayoría de los recubrimientos DLC se realizan por medio de técnicas de plasma o combinación de técnicas de plasma.

Existen tipos de recubrimientos que dependen del contenido de nitrógeno que pueden ser  $sp^2$  y  $sp^3$ , aquellos donde las uniones de átomos de carbono  $sp^3$  poseen un 80% reciben el nombre de carbono tetraédrico (ta-C) y los que tienen casi todos sus átomos en uniones  $sp^2$  son denominados glassy carbon. Además, existen películas denominadas carbono amorfo hidrogenado (a-c: H) que contienen hasta 60% de  $sp^3$  y 60% de hidrógeno.

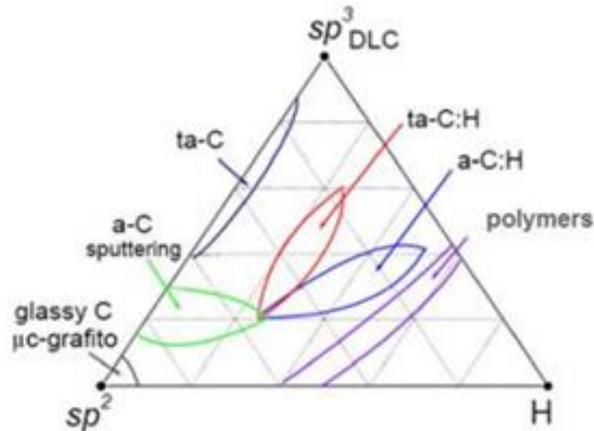


Figura 18 ternarios recubrimientos DLC tomado de RECUBRIMIENTOS EN BASE CARBONO TIPO "DLC" CARACTERÍSTICAS, PROPIEDADES Y APLICACIONES

Estos aspectos determinan el módulo elástico y la naturaleza de las películas y pueden ser denominados hard o soft si su módulo elástico es alto o bajo respectivamente; el recubrimiento DLC hard se aplica a instrumentos de corte como las cuchillas o instrumentos quirúrgicos y los recubrimientos DLC soft se usan para recubrir materiales blandos o roscas, donde la función principal de la película es absorber energía sin romperse.

Es importante la nitruración previa en las deposiciones de materiales blandos sin ninguna interfaz para que no haya problemas estructurales, ni de adhesión.

Las propiedades mecánicas de los recubrimientos DLC son medidas por el método de nanoindentación; una pequeña punta de diamante es gradualmente indentada en el recubrimiento y se mide la curva en el ciclo de la carga y la descarga en función del desplazamiento. Este método es necesario medirlo con cargas muy bajas para evitar la influencia del sustrato en la medición, ya que la profundidad de la marca no debe superar el 10 del espesor del recubrimiento, las cargas deben ser de 9mN aproximadamente.

	a-C:H Soft	a-C:H Hard	ta-C
Dureza (GPa)	< 10	10-20	80
Mód. de Young (GPa)	60-210	175-290	210-650
H (%)	40-50	30-40	0

Tabla 7 propiedades mecánicas de los recubrimientos DLC tomada de RECUBRIMIENTOS EN BASE CARBONO TIPO "DLC" CARACTERÍSTICAS, PROPIEDADES Y APLICACIONES

La tabla muestra algunas de las propiedades mecánicas de los recubrimientos DLC como lo son el módulo de Young y la dureza, además está indicado el porcentaje de hidrógeno.

El bajo coeficiente de fricción en los recubrimientos DLC se debe a la formación de capas que se denominan capas de transferencia. Durante el proceso de deslizamiento se generan partículas muy delgadas que pueden ser atrapadas en la interfase o ser adheridas en la superficie de la parte opuesta. Estas partículas están sometidas a compresión y son sinterizadas para formar capas sólidas y fuertes que soporten la carga. Estas también tienen características gráficas (relacionadas al grafito), las propiedades gráficas actúan como lubricante entre la contraparte y el recubrimiento, de esta manera se reduce el coeficiente de fricción.

El recubrimiento DLC presenta un buen comportamiento en cuanto al deslizamiento, es importante aclarar que el sustrato resiste altas cargas o presiones hertzianas, cuando se aumentan las cargas permitidas se puede conducir a la falla del sustrato, debido a que las tensiones máximas de corte se localizan a una profundidad mayor alcanzando la interfase de sustrato-recubrimiento. El comportamiento al desgaste abrasivo está ligado a la dureza y al comportamiento elástico (módulo de Young) del recubrimiento. El cociente entre la dureza y el módulo de Young (H/E) informa el índice de plasticidad del recubrimiento y es muy importante para determinar el límite del comportamiento elástico en la superficie de contacto; los recubrimientos DLC presentan un alto valor de índice de plasticidad (H/E) a diferencia del acero sin tratar.

Los recubrimientos soft presentan un comportamiento visco plástico, esto se refiere a que tienen la capacidad de recuperar parte de la deformación sin importar el sustrato. El desgaste por erosión es un fenómeno que influye en varios aspectos del recubrimiento como en la velocidad, la forma y el tamaño de las partículas erosivas, en los DLC el desgaste está muy asociado a la adhesión y a la presencia de defectos estructurales, ocasionando fisuras en la superficie, hasta el punto de que estas partículas erosivas crezcan alcanzando la interfase y produciendo la falla de la película.

Los recubrimientos con buena adhesión presentan mejor comportamiento a la erosión

La adhesión puede ser medida por medio de dos métodos: rayado con carga variable (scratch test) o el método de indentación Rocwell C según la norma establecida VDI 3198, este último método es más que todo para recubrimientos finos. En un acero inoxidable con recubrimientos DLC gruesos-Soft y finos-Hard la adhesión mejoró al utilizar como pretratamiento una capa nitrurada. [58]

La adhesión en películas DLC se puede mejorar utilizando una capa de pegamento interpuesta entre el sustrato y el recubrimiento, las capas intermedias de metal o compuesto como: titanio (Ti), circonio (Zr), tungsteno (W), niobio (Nb), silicio (Si), cromo (Cr) o WC) han demostrado su potencial para mejorar la adhesión de la película de DLC, Para mejorar la adhesión de las películas de DLC sobre sustratos de acero, se obtiene una capa de entremezclado de sustrato de cromo (Cr) mediante bombardeo iónico de la superficie del sustrato antes de depositar una capa intermedia de cromo (Cr) mediante pulverización catódica con magnetron.

Utilizando capas intermedias de tungsteno (W) o carburo de tungsteno (WC) sobre sustratos de acero, se descubrió que la adhesión de las películas de DLC depende en gran medida del espesor de las capas de tungsteno (W) depositadas por pulverización catódica y de la fracción de CH<sub>4</sub> en la fase gaseosa durante la deposición por pulverización catódica de las capas de carburo de wolframio (WC). Las capas intermedias de titanio (Ti) por sí solas no mejoran significativamente la adhesión de la película DLC, la capa de transición Ti / TiN / TiCN conduce a mejoras significativas de la adhesión de las películas DLC. Usando películas DLC, la superficie del sustrato se puede endurecer de modo que la velocidad SAW (dispositivo de ondas acústicas de superficie) se pueda incrementar debido a la alta constante elástica y la baja densidad de masa de las películas DLC. La introducción de las capas intermedias de óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) mejoró la fuerza de adhesión entre las películas DLC y los sustratos de tantalato de litio (LiTaO<sub>3</sub>).

A medida que aumentaba el espesor de la capa intermedia de óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>), aumentaba la carga crítica (L<sub>c</sub>) y la fuerza de adhesión, es decir, L<sub>c</sub> puede alcanzar un valor máximo de 19,5 N utilizando capas de 30 nm de espesor y de óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>). Para tener una mejor adhesión en las películas de DLC sobre sustratos de acero, el proceso de activación consiste en una nitruración de iones preliminar seguida de un grabado iónico de la superficie. Las protuberancias muy finas formadas por el proceso de activación proporcionaron una gran fuerza de adhesión a los sustratos.

No es necesaria una capa intermedia. El bombardeo inicial de iones de alta energía crea una capa de interfaz muy delgada, que permite el crecimiento de películas de carbono amorfo tetraédrico (ta-C) de hasta 6 μm de espesor.

La adhesión de películas DLC sobre biomateriales ortopédicos (acero inoxidable, CoCr y aleaciones de Ti) depende de la duración del tiempo de grabado de las superficies del sustrato mediante un haz de átomos de argón. Se ha demostrado que existe un tiempo de grabado óptimo para maximizar la adhesión de la película independientemente del tipo de aleación de metal del sustrato; no es función de los detalles de la capa de óxido superficial.

Esta variación de adhesión se correlaciona con la estructura de la película en términos del contenido de sp<sup>3</sup>. El tiempo óptimo para mejorar la adhesión se relaciona con la temperatura del sustrato durante el ataque y debe ser aproximadamente 75 ° C para lograr la mejor adhesión. Para depositar películas DLC duras de hexametildisiloxano (HMDSO) y reactivos de oxígeno fue necesario utilizar el método de recubrimiento iónico de plasma inductivamente (ICP).

El plasma de oxígeno fue el método de pretratamiento más eficaz para mejorar la adhesión de las películas de DLC sobre los sustratos poliméricos eliminando los contaminantes y formando los grupos funcionales polares en las superficies. La adhesión de películas DLC sobre sustratos de PMMA siempre fue mucho peor que sobre sustratos de PC. Para mejorar la adherencia de la película de DLC sobre sustratos de PMMA, se han depositado capas interfaciales mediante polimerización con plasma remoto para evitar la destrucción de grupos polifuncionales en los precursores de monómeros. [59]

## 9. CONCLUSIONES

De acuerdo a la investigación de antecedentes de los fenómenos corrosivos en algunos materiales recubiertos por DLC ; El recubrimiento DLC mejora en términos de adherencia al hacer un pretratamiento con algunos metales o compuestos como pueden ser el Titanio , Tungsteno , Silicio y Cromo ; Por medio del recubrimiento por la técnica Diamond like Carbon se analiza la viabilidad de sustituir el babbit por el DLC así mejorando propiedades como lo son obtener una baja fricción ya que al tener grafito en composición presentan bajos coeficientes de fricción (0,1) lo cual es bastante bueno para las demandas de trabajo a la cual se someten, además de su alta dureza (2400 HV) (23,54GPa) al ser un diamante sintético tiene grandes ventajas en cuanto a la fatiga que se somete , Está técnica tiene una gran variedad de deposición lo cual cada uno de ellas aporta distintas ventajas ya sea en demandas de dureza fricción erosión entre otras, abriendo así más campo de acción a la técnica de DLC

La vida útil de un cojinete de bancada es aproximadamente 5 años o 100.000km se realiza una lubricación (cambio de aceite) del mismo cada 5000 km. Es decir, dentro de lo ideal tendrá 20 cambios de aceite el cual oscila entre los 110.000 y los 150.000 pesos colombianos cada cambio, este recubrimiento arroja ventajas como prescindir de una lubricación y alargar la vida útil del sustrato, El valor comercial de este recubrimiento es mucho mas asequible a los costos de mantenimiento de los cojinetes de bancada a los cuales se sometería en condiciones normales.

En el análisis de antecedentes se adquirieron y profundizaron los conocimientos sobre recubrimientos y aún más en la técnica de DLC , ya que se estudiaron sus métodos de deposición los cuales llevan ciertos procesos desde variabilidades de reactores, crisoles hasta arreglo de bombas para generar distintos vacíos de trabajo adicionalmente se abarcaron las Técnicas de caracterización de superficies y películas delgadas las cuales nos dan una claridad sobre las ventajas y resultados del recubrimiento por la técnica de DLC

Con los pretratamientos como el silicio se mejora la capacidad de protección contra la corrosión de la película debido a las propiedades que tiene el silicio como su capacidad de aislar flujo de corrientes eléctricas , otro pretratamiento puede ser el nitruro de titanio el cual también presenta un buen rendimiento de protección contra la corrosión esto se debe a la formación de una capa pasiva que protege al recubrimiento de una mayor corrosión, y así una gran variedad de pretratamientos a lo que se puede someter el sustrato para mejorar los procesos ante la corrosión.

## 10.RECOMENDACIONES

Este proyecto es basado en antecedentes y teorías se espera poder germinar todas las conclusiones de manera practica teniendo acceso a desarrollar el proceso de recubrimiento teniendo los laboratorios pertinentes para corroborar de manera practica desarrollando Técnicas de caracterización de superficies y películas delgadas para así dar argumentos prácticos a los resultados puestos en este trabajo de grado, Profundizar y apoyar estas técnicas de recubrimiento en base DLC a nivel nacional ya que como se puede observar en este proyecto, tienen muy buenas ventajas y se pueden desempeñar en distintos campos de acción , en el caso de este trabajo de grado en el sector automotriz e industrial.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Fonte, V. Anes, P. Duarte, L. Reis, M. Freitas, Crankshaft failure analysis of a boxer diesel motor, *Eng. Fail. Anal.* 56 (2015) 109–115
- [2] F. Espadafor, J. Villanueva, M. Garcia, Analysis of a diesel generator crankshaft failure, *Eng. Fail. Anal.* 16 (2009) 2333–2341.
- [3] J. Becerra, F. Jimenez, M. Torres, D. Sanchez, E. Carvajal, Failure analysis of reciprocating compressor crankshafts, *Eng. Fail. Anal.* 18 (2011) 735–746
- [4] Fonte, M.; Freitas, M.; Reis, L. (2019). Failure analysis of a damaged diesel motor crankshaft. *Engineering Failure Analysis*, 102(), 1–6. doi:10.1016/j.engfailanal.2019.04.025
- [5] Fonte, M., Anes, V., Duarte, Reis, P., L., Freitas, M., 2015. Crankshaft failure analysis of a boxer diesel motor. *Eng. Failure Anal.* 56, 109-115.
- [6] Silva, F.S., 2003. Analysis of a vehicle crankshaft failure, *Engineering Failure Analysis* 10, 605-616.
- [7] Witek, Lucjan; Stachowicz, Feliks; Załęski, Arkadiusz (2017). Failure investigation of the crankshaft of diesel engine. *Procedia Structural Integrity*, 5(), 369–376. doi:10.1016/j.prostr.2017.07.184
- [8] Mazurkiewicz, A.; Smolik, J.; Zbrowski, A.; Kacprzyńska, J. (2014). Innovative technical solutions for evaporation of multilayer coatings by EB-PVD method. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 14(2), 250–254. doi:10.1016/j.acme.2013.09.008
- [9] MUSIL J, KADLEC S. *Vacuum* 1990; 40 (5): 435-44
- [10] R.Cué-Sampedro, Hernández-Hernández, R.; Garza, Luis L. (2019). Research on UV attenuating nanocoatings on glass using PVD by sputtering. *Materials Today: Proceedings*, 13(), 349–352. doi:10.1016/j.matpr.2019.03.164
- [11] Baptista, A.; Silva, F.J.G.; Porteiro, J.; Míguez, J.L.; Pinto, G.; Fernandes, L. (2018). On the Physical Vapour Deposition (PVD): Evolution of Magnetron Sputtering Processes for Industrial Applications. *Procedia Manufacturing*, 17(), 746–757. doi:10.1016/j.promfg.2018.10.125
- [12] B. Škorić; D. Kakaš; M. Rakita; N. Bibić; D. Peruškob (2004). Structure, hardness and adhesion of thin coatings deposited by PVD, IBAD on nitrided steels. , 76(2-3), 169–172. doi:10.1016/j.vacuum.2004.07.005
- [13] P. Hollman; P. Hedenqvist; S. Hogmark; G. Stenberg; M. Boman (1997). Tribological evaluation of thermally activated CVD diamond-like carbon (DLC) coatings. , 96(2-3), 230–235. doi:10.1016/s0257-8972(97)00114-x
- [14] M.M.García Poza; M.Hernández Vélez; J. Jiménez; C. Gómez-Aleixandre; J.Sánchez Olías; A.Blanco Montes; J.M. Albella (1996). Characterization of bias enhanced MWCVD diamond thin films. , 29(1-3), 0–115. doi:10.1016/s0167-577x(96)00126-7
- [15] Juh-Tzeng Lue; Sheng-Yuan Chen; Chi-Ling Chen; Mei-Chung Lin (2000). Field emission studies of diamond-like films grown by RFCVD. , 265(3), 0–237. doi:10.1016/s0022-3093(00)00006-5
- [16] A. Erdemir, C. Donnet, Tribology of diamond-like carbon films: recent progress and future prospects, *J. Phys. D* 39 (2006) R311–R327.
- [17] L. Ilberg, H. Manis-Levy, A. Raveh, Y. Lifshitz, M. Varenberg, Effect of structure of carbon films on their tribological properties, *Diam. Relat. Mater.* 38 (2013) 79–86.
- [18] H.G. Kim, S.H. Ahn, J.G. Kim, S.J. Park, K.R. Lee, Effect of Si-incorporation on wearcorrosion properties of diamond-like carbon films, *Thin Solid Films* 482 (2005) 299–304.
- [19] Z. Wang, C. Wang, Q. Wang, J. Zhang, Electrochemical corrosion behaviors of a-C:Hand a-C:Nx:H films, *Appl. Surf. Sci.* 254 (2008) 3021–3025.
- [20] G. Miyaji, K. Miyazaki, Origin of periodicity in nanostructuring on thin film surfaces ablated with femtosecond laser pulses, *Opt. Express* 16 (2008) 16265–16271
- [21] J. Bonse, S. Höhm, V. Kirner, A. Rosenfeld, J. Krüger, Laser-induced periodic surface structures – a scientific evergreen, *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics* 23 (2017) 9000615
- [22] S.M. Pimenov, E.V. Zavedeev, N.R. Arutyunyan, O.S. Zilova, M.L. Shupegin, B. Jaeggi, B. Neuenschwander, Femtosecond-laser surface modification and micropatterning of diamond-like

- nanocomposite films to control friction on the micro and macroscale, *J. Appl. Phys.* 122 (2017) 145301.
- [23] Yasumaru, Naoki; Kasashima, Haruka; Sentoku, Eisuke; Funabora, Hisato; Tominaga, Ryoya; Harigai, Toru; Takikawa, Hirofumi (2020). Corrosion performance of DLC coatings with laser-induced graphitized periodic surface structure. *Diamond and Related Materials*, 109(), 108046–. doi:10.1016/j.diamond.2020.108046
- [24] Jo, Yeong Ju; Zhang, Teng Fei; Son, Myoung Jun; Kim, Kwang Ho (2017). Synthesis and Electrochemical Properties of Ti-doped DLC Films by a Hybrid PVD/PECVD Process. *Applied Surface Science*, (), S0169433217331021–. doi:10.1016/j.apsusc.2017.10.151
- [25] S. Gayathri, N. Kumar, R. Krishnan, T.R. Ravindran, S. Amirthapandian, S. Dash, In fluence of transition metal doping on the tribological properties of pulsed laser deposited DLC films, *Ceram. Int.* 41 (2015) 1797–1805, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.05.044>.
- [26] D. Hofmann, S. Kunkel, K. Bewilogua, R. Wittorf, Surface & coatings technology from DLC to Si-DLC based layer systems with optimized properties for tribological applications, *Surf. Coat. Technol.* 215 (2013) 357–363, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.06.094>.
- [27] Sharifahmadian, Omid; Mahboubi, Farzad; Yazdani, Sepehr (2019). Comparison between corrosion behaviour of DLC and N-DLC coatings deposited by DC-pulsed PACVD technique. *Diamond and Related Materials*, 95(), 60–70. doi:10.1016/j.diamond.2019.04.007
- [28] S. Miyagawa, S. Nakao, M. Ikeyama, Y. Miyagawa, *Surf. Coat. Technol.* 156 (2002) 322.
- [29] A.K. Gangopadhyay, P.A. Willermet, M.A. Tamor, W.C. Vassell, *Tribol.Int.* 30 (1997) 9
- [30] W.J. Wu, T.M. Pai, M.H. Hon, *Diamond Relat. Mater.* 7 (1998) 1478
- [31] H. Mori, H. Tachikawa, *Surf. Coat. Technol.* 149 (2002) 225230.
- [32] Choi, J.; Nakao, S.; Kim, J.; Ikeyama, M.; Kato, T. (2007). Corrosion protection of DLC coatings on magnesium alloy. *Diamond and Related Materials*, 16(4-7), 1361–1364. doi:10.1016/j.diamond.2006.11.088
- [33] L. Wang; J.F. Su; X. Nie (2010). Corrosion and tribological properties and impact fatigue behaviors of TiN- and DLC-coated stainless steels in a simulated body fluid environment.,205(5), 1599–1605. doi:10.1016/j.surfcoat.2010.07.111
- [34] J. Park, D.J. Kim, Y.K. Kim, K.H. Lee, H. Lee, S. Ahn, *Thin Solid Films* 435 (2003) 102.
- [35] M. Braic, M. Balaceanu, V. Braic, A. Vladescu, G. Pavelescu, M. Albulescu, *Surf. Coat. Technol.* 200 (2005) 1014.
- [36] Y.X. Leng, H. Sun, P. Yang, J.Y. Chen, J. Wang, G.J. Wan, N. Huang, X.B. Tian, L.P. Wang, P.K. Chu, *Thin Solid Films* 398–399 (2001) 471
- [37] A. Wisbey, P.J. Gregson, M. Tuke, *Biomaterials* 8 (1987) 477
- [38] H.P. Zheng, Y.W. Shao, Y.Q. Wang, G.Z. Meng, B. Liu, Reinforcing the corrosion protection property of epoxy coating by using graphene oxide–poly(urea– formaldehyde) composites, *Corros. Sci.* 123 (2017) 267–277
- [39] T. Konishi, K. Yukimura, K. Takaki, Fabrication of diamond-like carbon films using short-pulse HiPIMS, *Surf. Coat. Tech.* 286 (2016) 239–245.
- [40] Y.J. Jo, T.F. Zhang, M.T. Son, K.H. Kim, Synthesis and electrochemical properties of Ti-doped DLC films by a hybrid PVD/PECVD process, *Appl. Surf. Sci.* 433 (2018) 1184–1191.
- [41] Wu, Yangmin; Zhou, Shengguo; Zhao, Wenjie; Ouyang, Lu (2018). Comparative corrosion resistance properties between (Cu, Ce)-DLC and Ti co-doped (Cu, Ce)/Ti-DLC films prepared via magnetron sputtering method. *Chemical Physics Letters*, 705(), 50–58. doi:10.1016/j.cplett.2018.05.061
- [42] H. Dong, P.-Y. Qi, X.Y. Li, R.J. Llewellyn, Improving the erosion–corrosion resistance of AISI 316 L austenitic stainless steel by low-temperature plasma surface alloying with N and C, *Materials Science and Engineering* 431 (2006) 137–145.
- [43] M. Suzuki, T. Ohana, A. Tanaka, Tribological properties of DLC films with different hydrogen contents in water environment, *Diamond and Related Materials* 13 (11–12) (2004) 2216–2220
- [44] J. Robertson, *Materials Science and Engineering* 37 (2002) 129–281.
- [45] N. Ueda, et al., DLC film coating on plasma-carburized austenitic stainless steel, *Surface & Coatings Technology* 201 (9–11) (2007) 5487–5492

- [46] Morten S. Jellesen; Thomas L. Christiansen; Lisbeth Rischel Hilbert; Per Møller (2009). Erosion–corrosion and corrosion properties of DLC coated low temperature gas-nitrided austenitic stainless steel. , 267(9-10), 1709–1714. doi:10.1016/j.wear.2009.06.038
- [47] H. Czichos, K.-H. Habig, *Tribologie-Handbuch*, Vieweg Verlag, 2003.
- [48] J. Xu, M.H. Zhu, Z.R. Zhou, P. Kapsa, L. Vincent, *Wear* 255 (2003) 253–258.
- [49] B. Rajasekaran, S. Ganesh Sundara Raman, S.V. Joshi, G. Sundararajan, *Surf. Coat. Technol.* 201 (2006) 1548–1558.
- [50] A.-S. Loir, D. Pech, P. Steyer, Y. Gachon, C. Héau, J.C. Sánchez-López, *Plasma Process. Polym.* 4 (2007) 173–179.
- [51] David Pech; Norbert Schupp; Philippe Steyer; Theo Hack; Yves Gachon; Christophe Héau; Anne-Sophie Loir; Juan Carlos Sánchez-López (2009). Duplex SiCN/DLC coating as a solution to improve fretting—Corrosion resistance of steel. 266(7-8), 832–838. doi:10.1016/j.wear.2008.12.007
- [52] J. Robertson, *Thin Solid Films* 383 (2001) 81–88
- [53] R. Ramesham, M.F. Rose, *Diamond Rel. Mater.* 6 (1997) 17–27
- [54] F. Mansfeld, *J. Appl. Electrochem.* 25 (1995) 187–202
- [55] F. Mansfeld, M.W. Kendig, *J. Electrochem. Soc.* 135 (1988) 828–833.
- [56] Z.H. Liu, J.F. Zhao, J. McLaughlin, *Diamond Rel. Mater.* 8 (1999) 56–63
- [57] Papakonstantinou, P.; Zhao, J.F.; Richardot, A.; McAdams, E.T.; McLaughlin, J.A. (2002). Evaluation of corrosion performance of ultra-thin Si-DLC overcoats with electrochemical impedance spectroscopy. *Diamond and Related Materials*, 11(3-6), 1124–1129. doi:10.1016/S0925-9635(01)00688-4
- [58] Brühl, S., Dalibón, E. and Nahuel Pecina, N., 2016. RECUBRIMIENTOS EN BASE CARBONO TIPO “DLC” CARACTERISTICAS, PROPIEDADES Y APLICACIONES. Asociación Argentina de Tribología 2016-08,.
- [59] Donnet, Christophe; Erdemir, Ali (2008). *Tribology of Diamond-Like Carbon Films* || . , 10.1007/978-0-387-49891-1(), -. doi:10.1007/978-0-387-49891-1

## 12. CIBERGRAFÍA

1. [▷ Cojinetes de motor 【 Que son | Cual es su funcion | Tipos 】 ✓ \(automociononline.com\)](#)
2. [Cojinetes, materiales y diagnóstico • LUBRI-PRESS \(lubri-press.com\)](#)
3. [METALMECÁNICA // 4-Montaje de Cojinetes de Fricción \(sena.edu.co\)](#)
4. [¿De qué material están hechos los cojinetes y casquillos? | GGB \(ggbearings.com\)](#)
5. [Cojinetes de metal antifricción - \(interempresas.net\)](#)
6. [1 http://lacey.se/science/eis/eis-principles/](#)
7. [https://www.jlab.org/conferences/tfsrf/Thursday/Th2\\_1-EIS%20intro%20Reece.pdf](https://www.jlab.org/conferences/tfsrf/Thursday/Th2_1-EIS%20intro%20Reece.pdf)